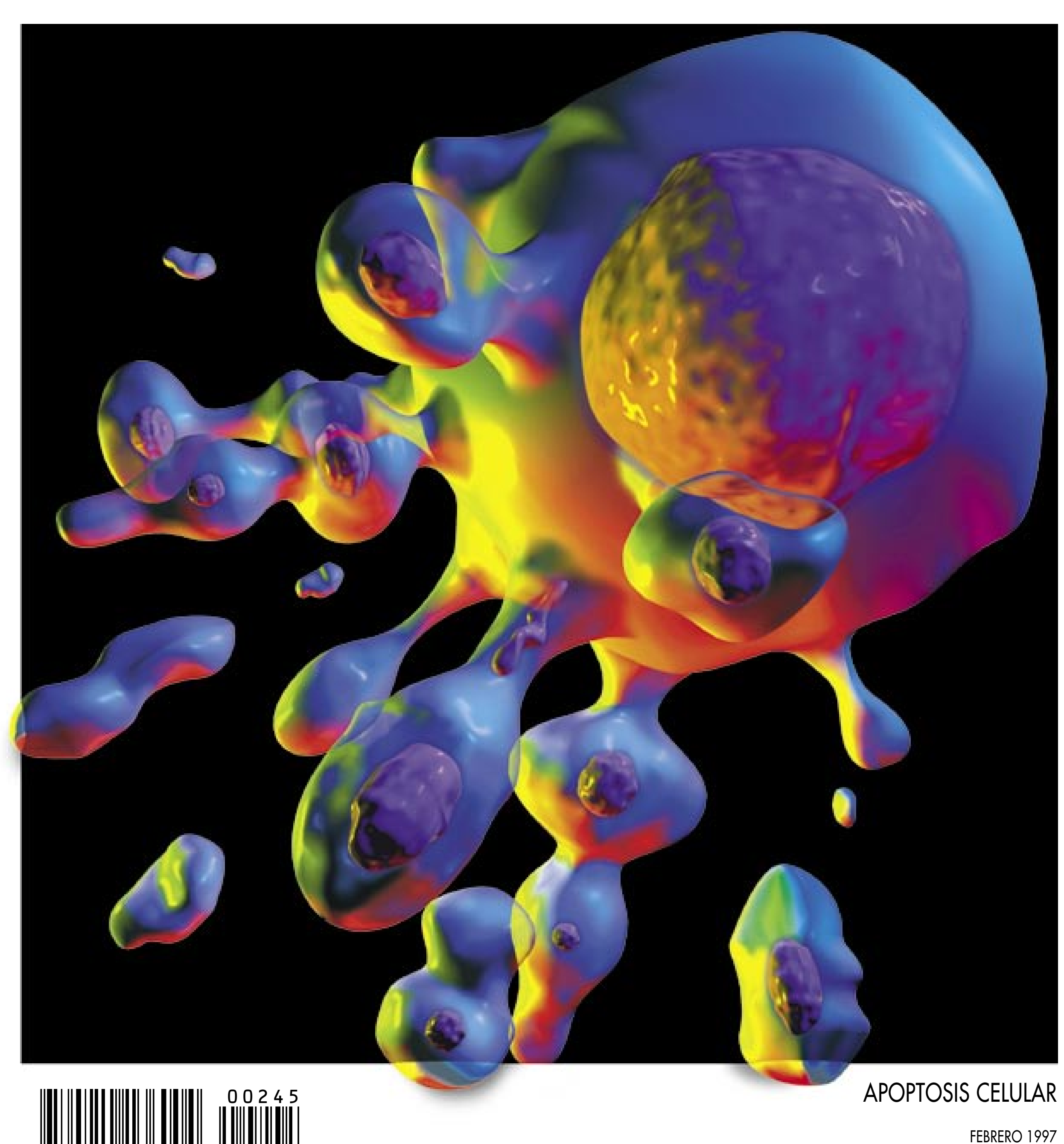
INVESTIGACION y CIENCIA

ORIGEN DE IBERICOS, VASCOS Y ARGELINOS

INFANCIA DEL UNIVERSO

¿EXISTE RIESGO DE UNA GUERRA BACTERIOLOGICA?

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN



APOPTOSIS CELULAR

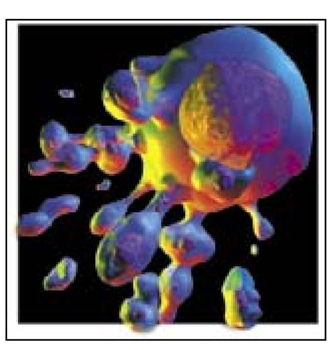
00245
9 770210 136004

FEBRERO 1997
800 PTAS.




Febrero de 1997 Número 245

SECCIONES



Portada: Slim Films

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
5	M. Milner, *Sygma*
6	Patric Robert, *Sygma*
7	M. Walker, Photo Researchers (*arriba*); CNRI, Science Photo Library/Photo Res. (*centrales*); Photo Researchers (*abajo*)
8	Brian R. Wolff, *IIPI*
10	Cortesía de Craig J. Hogan
11	Roger Ressmeyer, *Corbis*
12-13	Cortesía de Craig J. Hogan (*inserto*); Alfred T. Kamajian (*pintura*)
14	Ian Worpole
15	Cortesía del Observatorio Naval de EE.UU.; Ian Worpole (*retoque*)
18-19	Remi Benali, *Gamma Liaison*
20-21	Silvia Otte (*foto*); Jennifer C. Christiansen (*dibujo*); George Thomas (*micrografía*)
22	Marc Fiüeli y Philippe-André Buffat (*arriba*); Jennifer C. Christiansen (*abajo*)
23	Adam Licht
45	Audra Geras
46	Brian V. Harmon, Universidad de Tecnología de Queensland (*arriba*); Jared Schneidman Design (*abajo*)
47	Jared Schneidman Design
48-49	Slim Films
50-51	Jared Schneidman Design
54-55	Roberto Osti
56	Jennifer C. Christiansen
57	Roberto Osti
58	John Beatty, *Tony Stone Worldwide*
60-61	Tomo Narashima; O. Louis Mazzatenta, colección del National Geographic (*fotografía*)
62	Museo Fitzwilliam, Universidad de Cambridge; Museo Egipcio, El Cairo (*arriba*); Ministerio de Cultura y Medio Ambiente, Museo Egipcio, Turín (*abajo*)
63	Media Services, Museo Hunter, Univ. de Glasgow
64	Medelhavsmuseet, Museo de Antigüedades del Mediterráneo y del Próximo Oriente, Estocolmo; Museo Egipcio, Univ. de Leipzig
65	Instituto Oriental de Arqueología, El Cairo
67-70	Antonio Arnaiz Villena y Jorge Martínez Laso
72-73	Laurie Grace (*composición digital*); Barbara Webb (*foto*)
74	Jeff Foott, *Bruce Coleman Inc.*
75-76	Laurie Grace
77	Robert P. Carr, *Bruce Coleman Inc.* (*animal*); Barbara Webb (*modelo*)
84-86	Jennifer C. Christiansen
87	Edward Bell; adaptado por *SKI & TELESCOPE*
88	Ian Worpole
96	DRT MFG. CO. (*fotografía*); M. Goodman (*arriba. dcha.*); Dan Wagner; retoque color Michael Goodman (*abajo, dcha.*); Jim Callaway *SABA* (*abajo, izda.*)

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

José María Valderas Martínez: *Armas biológicas*; Juan Pedro Campos: *El deuterio primordial y la gran explosión*; Xavier Obradors: *Creación de materiales nanofásicos*; Santiago Torres: *Suicidio celular, en la salud y en la enfermedad*; Manuel Puigcerver: *Polvo atmosférico y lluvia ácida*; J. M. García de la Mora: *La vida diaria en el antiguo Egipto*; Luis Bou: *Un grillo robot*; J. Vilardell: *Hace...*, *Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Diana Estévez: *Informática*

Ciencia y sociedad: Juan Pedro Campos y Manuel Puigcerver

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting y Timothy M. Beardsley, *Associate Editors*; John Horgan, *Senior Writer*; Corey S. Powell, *Electronic Features Editor*; W. Wayt Gibbs; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Glenn Zorpette; Marguerite Holloway, *Contributing Editor*
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
PUBLISHER Joachim P. Rosler

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	11.000	20.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

—En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 – 08907 L'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «El uranio podría emplearse como patrón monetario internacional en sustitución de la plata y el oro, tradicionales estándares internacionales de la riqueza. La fisión atómica puede convertir directamente en energía al menos una parte de una masa de uranio; la energía, o sea, la capacidad de realizar trabajo, se sugiere como cimiento de los valores económicos bastante más lógico que los que poseen los metales preciosos. La dureza del uranio y la facilidad con que se oxida impide su uso en las monedas modernas. Sin embargo, las distintas propuestas acerca del control internacional de las sustancias fisionables podrían por sí mismas llevarnos a un papel moneda internacional respaldado por un depósito de uranio metálico controlado por un único centro.»

«Por fin los químicos han conseguido dominar el flúor, el más ingobernable de los elementos. El primer plástico comercial de flúor es un polímero del tetrafluoretileno, un plástico translúcido y ceroso, estable hasta los 250 grados centígrados. La resistencia química del Teflon, tal es el nombre dado al material, es excepcional. Pero, a tenor de su precio, su campo de aplicación es limitado. Además de su empleo en instalaciones eléctricas, es muy probable que pudiera aplicarse como material para juntas y conductos inertes en la industria química.»

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Según *Medical Report*, miss Lilias Hamilton, médico personal del emir de Afganistán, ha logrado convencer a su real paciente de las ventajas de la vacuna. Cada primavera, la viruela asuela el país matando a un niño de cada cinco. El emir ha decretado la vacuna obligatoria en todos sus estados. Se ha dado la orden de construir establos y de criar terneras. Miss Hamilton ha sido encargada de organizar un servicio general de vacunación.»

«En el fondo del océano la presión es enorme. A 2500 brazas la presión es treinta veces más intensa que la presión del vapor de una locomotora que arrastre un tren. Ya en 1880 un destacado zoólogo explicó la existencia de animales de las profundidades marinas suponiendo que sus cuerpos estuvieran compuestos de sólidos y líquidos de gran densidad y sin aire. No es éste el caso de los peces de las profundidades, provistos de vejigas natatorias que se llenan de aire. Los miembros de estas desgraciadas especies son susceptibles de ser víctimas del insólito accidente de caerse hacia arriba y, sin duda, encontrar una muerte violenta al poco de abandonar su profundidad acostumbrada.»

«En Nueva York una tormenta de nieve fuerte es la señal para poner en orden de batalla a todas las fuerzas del Departamento de Limpieza Callejera. Durante días una compacta columna de carros, llenos de nieve, avanza en dirección al río, donde aquélla se arroja. Son muchos los experimentos llevados a cabo para eliminar un material de tan difícil manejo en favor de unos procedimientos menos pesados y costosos. Ilustramos aquí una licuadora de nieve quemadora de nafta recientemente ensayada en Nueva York. La llama generada por la nafta al quemarse en el aire entra en contacto directo con la nieve, fundiéndola al momento. Para alimentar el monstruo insaciable se necesitan catorce hombres.»

Licuadora de nieve en funcionamiento

...ciento cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Más acerca del hambre: Un periódico de Liverpool afirma que el desembarco en ese puerto de irlandeses hambrientos excede de los 1000 diarios; en su mayoría mujeres y niños. En Irlanda los guardianes de la 'Ley de los Pobres' han sido obligados a cerrar las puertas de las casas de caridad (asilos para pobres), y en sus propias palabras 'adoptar la terrible alternativa de excluir a centenares de seres enfermos y hambrientos que cotidianamente solicitan la admisión'. Sólo en una de esas casas fallecieron doscientos sesenta en el curso de tres meses. Resulta imposible procurarse ataúdes para los muertos; y los cadáveres se arrojan a las fosas sin otro atavío que los harapos que vestían en vida. 400.000 hombres aceptaron contentos un empleo por diez peniques diarios, con los que muchos sostienen a su familia, pese a los elevados precios de los alimentos.»

«Un escritor berlinés da a conocer el proyecto Panamá que el príncipe Luis Napoleón está a punto de comenzar en Centroamérica, al objeto de poner en aplicación la idea de unir los dos océanos. El profesor Charles Ritter, geógrafo reputado, ha informado a la Sociedad Geográfica de Berlín del proyecto del príncipe, proyecto que éste concibió, tal parece, durante su encarcelamiento en Ham.»

Armas biológicas

El arsenal biológico ha despertado un interés creciente en los estados y en las bandas terroristas. Son necesarios controles más estrictos sobre este tipo de armamento para evitar su empleo

Leonard A. Cole

En 1995 tuve la ocurrencia de preguntarle a un amigo: "¿Qué te inspira mayor temor, ser víctima de un ataque con armas biológicas o de un bombardeo químico?" Me miró estupefacto. "La verdad es que lo que me produce pavor es el Alzheimer", me contestó. Soltamos una carcajada. De forma ingeniosa había esquivado mi pregunta por considerar el tema improcedente. En una sociedad civilizada, las personas no piensan en esas cosas.

Al día siguiente, el veinte de marzo, alguien soltó sarina, un agente nervioso, en el metropolitano de Tokio. Murieron 12 personas y 5500 más sufrieron lesiones. En Japón, nada menos, uno de los países más seguros del mundo. Telefoneé a mi amigo y comentamos la coincidencia en el tiempo con mi pregunta a bote pronto. Lo que un día había sido un juego aparentemente frívolo se convirtió, al día siguiente, en un asunto mortalmente trágico.

Si en el ataque de Tokio no murieron miles de personas, hay que atribuirlo a la composición impura del gas. La sarina se desarrolló en los años treinta en Alemania y apenas una gota basta para matar en pocos minutos, por contacto cutáneo o por inhalación de sus vapores. Al igual que el resto de agentes nerviosos, esta substancia bloquea la acción de la acetilcolinesterasa, una enzima necesaria para la transmisión de los impulsos nerviosos.

La secta responsable del ataque, Aum Shinrikyo ("Verdad Suprema"), estaba preparando también agentes biológicos. Si un ataque químico es algo terrible, mucho peor lo es uno biológico. Los agentes químicos son inanimados, pero las bacterias, los virus y otros agentes vivos pueden ser contagiosos y reproducirse: una vez establecidos en un ambiente, se multiplican. A diferencia de cualquier otro tipo de armamento, el biológico incrementa su peligrosidad con el tiempo.

LEONARD A. COLE enseña ciencias políticas en la Universidad Rutgers en Newark. Es una autoridad mundial en el campo de las relaciones entre ciencia y política.

Unos agentes biológicos incapacitan a la víctima; otros, la matan. El virus Ebola, por ejemplo, acaba con la vida del 90 por ciento de sus víctimas en poco más de una semana. El tejido conectivo se licua; se observan hemorragias en todos los orificios. Los atacados por el virus Ebola sufren convulsiones en los estadios finales de la enfermedad. De esta forma esparcen su sangre contaminada mientras se doblan y retuercen hasta fallecer.

No existe cura ni tratamiento conocido para el virus Ebola. Ni siquiera se sabe con claridad cuál es su mecanismo de propagación: si por contacto con las víctimas y su sangre, sus fluidos y restos corporales, o sencillamente al respirar el aire de un mismo ambiente. La reciente aparición de brotes en el Zaire obligó a poner en cuarentena regiones enteras del país hasta que la enfermedad remitió.

El horror que todo esto representa sólo se ve superado por la posibilidad de que individuos o naciones tomen en consideración el recurso a emplear tales virus para atacar a otros. En octubre de 1992 Shoko Asahara, jefe de la secta Aum Shinrikyo, y cuarenta de sus seguidores viajaron al Zaire, supuestamente para socorrer a las víctimas del virus Ebola. Pero, según consta en informe del 31 de octubre de 1995 del subcomité permanente de investigaciones del Senado de los Estados Unidos, su intención fue probablemente la de obtener muestras del virus para poder cultivarlas y emplearlas en ataques biológicos.

También en EE.UU. existen grupos interesados en la obtención de organismos asesinos con fines siniestros. El 5 de mayo de 1995, seis semanas después del incidente en el metro de Tokio, Larry Harris, técnico de laboratorio en Ohio, solicitó a una empresa de suministros biomédicos de Maryland la bacteria que provoca la peste bubónica. La compañía, American Type Culture Collection de Rockville, le envió por correo tres envases con muestras de *Yersinia pestis*.

Harris sólo levantó sospechas cuando telefoneó a la empresa cuatro días después de enviar su petición para preguntar por qué aún no la habían satisfecho. Los encargados de la compañía se sorprendieron de su impaciencia y de su falta de familiaridad con las técnicas de laboratorio, por lo que decidieron ponerse en contacto con las autoridades federales. Se descubrió más tarde que pertenecía a una organización en pro de la supremacía de la raza blanca. En noviembre de 1995 se declaró culpable de fraude postal ante un tribunal federal.

Harris no precisó más que de una tarjeta de crédito y un membrete falso para hacerse con la bacteria. En parte debido a este hecho, una ley aprobada en abril de 1996 obliga a los centros de prevención y control de las enfermedades a verificar con mayor detenimiento los envíos de agentes infecciosos.

¿Qué es lo que podría haber hecho Harris con la bacteria? El sostuvo que

1. EN 1991, durante la guerra del golfo Pérsico y ante la posibilidad de un ataque iraquí con armamento químico o biológico, se distribuyeron entre los viajeros máscaras de gas en el aeropuerto de Tel Aviv.

quería llevar a cabo investigaciones para eliminar ratas iraquíes que llevaran gérmenes de especial virulencia. Pero si hubiera intentado desarrollar un arsenal biológico, le hubiera sido aterradoramente sencillo. *Yersinia pestis* se divide cada veinte minutos. Una sola bacteria puede producir más de mil millones de copias en diez horas. Basta una pequeña muestra de microorganismos para engendrar un cifra altísima en una semana. En algunas enfermedades, como el ántrax, la inhalación de un par de miles de bacterias —que no ocuparían un área mayor que el punto que cierra esta frase— sería fatal.

Kathleen C. Bailey, que fuera directora adjunta de la estadounidense Oficina de Control y Desarme, ha visitado varios laboratorios farmacéuticos y empresas dedicadas a la biotecnología. Está absolutamente convencida de que se puede desarrollar un arsenal biológico respetable en una habitación de cinco metros cuadrados con una inversión en equipamiento de diez mil dólares. Al fin y al cabo, un equipo tan sencillo como un fermentador de cerveza, un medio de cultivo con proteínas, una máscara de gas y un traje de plástico bastan para cultivar billones de bacterias, con un riesgo relativamente pequeño para los manipuladores.

Afortunadamente, el terrorismo biológico se ha limitado a casos contados. En septiembre de 1984, en una ciudad de Oregón llamada The Dalles, unas setecientas cincuenta personas enfermaron tras haber comido en restaurantes. Ma Anand Sheela confesó ante un tribunal federal que pertenecía a un grupo, equiparable a una secta, enfrentado a los vecinos y que ella y otros miembros del grupo diseminaron bacterias del género *Salmonella* en ensaladas de cuatro restaurantes. Las bacterias procedían de cultivos realizados en laboratorios instalados en el rancho de la secta. Sheela ocupaba una posición preeminente dentro de la secta, liderada por Bhagwan Shree Rajneesh, y pasó dos años y medio en prisión, tras los cuales fue deportada a Europa.

Según indica un informe de 1992 de la Oficina de Asesoramiento de Asuntos Técnicos, el terrorismo biológico y químico ha sido hasta ahora excepcional. Como infrecuente también ha sido el empleo militar de agentes biológicos. Tal vez el primer incidente del que se tiene noticia ocurriera en el siglo XIV, cuando una flota que puso asedio a la ciudad de Kaffa, un puerto del Mar Negro, en Crimea, catapultó cadáveres de víctimas de la peste por encima de las murallas de la ciudad. Existen documentos que certifican que, en la América colonial, un oficial inglés distribuyó entre los indios mantas contaminadas con gérmenes de la viruela que había sacado de la enfermería con la intención de desencadenar una epidemia entre las tribus. En este siglo, sólo se tiene constancia oficial del empleo que Japón hizo de bacterias, como la responsable de la peste y otras, contra China en los años treinta y cuarenta.

Ahora que termina el siglo veinte, nos encontramos ante una desagradable paradoja. Nunca antes tantos estados habían firmado tratados internacionales para la eliminación de armas químicas y biológicas. Pero se sospecha que son muchos los que están desarrollándolas a pesar de tales tratados. En 1980 sólo un país, la Unión Soviética, fue denunciado por EE.UU. por violar la convención sobre armas biológicas de 1972, un



tratado que prohíbe el desarrollo o la posesión de armas biológicas.

Desde entonces, el número se ha disparado. En 1989 William Webster, director de la Oficina Central de Inteligencia (CIA), anunció que al menos diez países fabricaban armas biológicas. En 1995 eran ya diecisiete, según fuentes citadas por la Oficina de Asesoramiento de Asuntos Técnicos y las sesiones del comité del Senado de EE.UU.: Irán, Irak, Libia, Siria, Corea del Norte, Taiwan, Israel, Egipto, Vietnam, Laos, Cuba, Bulgaria, India, Corea del Sur, Sudáfrica, China y Rusia. (Los líderes rusos insisten en haber cerrado su programa biológico, pero los EE.UU. lo ponen en duda.)

Irán, Irak, Libia, Siria y Corea del Norte inspiran especial preocupación a la vista de su historial militar. Irak, por ejemplo, ha reconocido las acusaciones de los inspectores de Naciones Unidas de que se encontraba en posesión de misiles Scud con cabeza biológica durante la guerra del golfo Pérsico en 1991. En 1994 un informe del Pentágono al Congreso de EE.UU. señalaba la inestabilidad en Europa oriental, Oriente Medio y el Sudoeste asiático como factores que incitaban a cada vez más países a desarrollar armas químicas y biológicas.

Debería ser una cuestión de primer orden para la comunidad de naciones el revertir esta tendencia. La eliminación de armamento químico y biológico es una meta valiosa, si bien difícil. El fracaso en este empeño reforzaría la posibilidad de que se produjeran plagas provocadas por el hombre, ya fuera del virus Ebola o de otro agente igualmente estremecedor.

El empeño en el desarme biológico debería verse respaldado con la consideración de otro dato alarmante: en numerosas situaciones, la población general carece de defensa ante un ataque biológico. Las vacunas pueden prevenir algunas enfermedades, pero sólo son eficaces si se sabe a qué microorganismo hay que hacer frente. Los antibióticos resultan eficaces contra bacterias o clases de agentes biológicos específicas, pero no contra todas ellas, indiscriminadamente. Aún más, la incidencia de enfermedades infecciosas crece en todo el mundo por la aparición de cepas de bacterias resistentes al tratamiento. En esta era de la biotecnología, en suma, se pueden diseñar organismos nuevos contra los que nada pueden vacunas y antibióticos.

Las barreras físicas contra la infección no producen ninguna tranquilidad. Afortunadamente, la mayoría de los agentes infecciosos no tienen efecto sobre la piel intacta ni pueden atravesarla. Una máscara de gas y la ropa apropiada bastan para proporcionar protección suficiente. Tras un corto período de tiempo, el peligro remitirá al destruir la luz del sol y la temperatura ambiente los agentes. Pero algunos microorganismos pueden permanecer indefinidamente en el medio. La isla de Gruinard, frente a las costas escocesas, estuvo contaminada durante cuarenta años con esporas de ántrax, debido a los experimentos sobre armamento biológico que se llevaron a cabo durante los años cuarenta. Rex Watson, jefe del departamento de defensa química y biológica británico, aseguró en 1981 que, si se hubiera bombardeado Berlín con bacterias productoras de ántrax durante la segunda guerra mundial, la ciudad seguiría todavía contaminada.



2. ENTERRAMIENTO EN MASA en una fosa común de las víctimas del virus Ebola, en Kikwit (Zaire), en 1995. La secta japonesa Aum Shinrykyo consideró su uso como arma biológica.

Si bien muchos israelíes se acostumbraron a llevar máscaras en 1991 durante la guerra del golfo Pérsico, no cabe esperar que la población civil emplee semejante equipo durante meses o años. Los inspectores de Naciones Unidas en Irak explicaron que, si hacía calor, apenas podían soportar la máscara más de quince minutos seguidos.

Se han multiplicado las voces en favor de programas de defensa biológica más sólidos, especialmente a raíz de la guerra del golfo Pérsico. Los que apoyan un aumento de las subvenciones a la investigación de defensa biológica aducen que el material y las vacunas desarrollados sería susceptible de proteger tanto a la población civil como a la militar. Pero lo cierto es que, y esto vale para soldados y paisanos, a menos que se conozca con antelación el organismo responsable del ataque y sea además sensible a procesos médicos, la defensa puede ser una quimera.

Ciertamente la experiencia de la guerra del golfo Pérsico puede inducir a error en algunos aspectos. Se creyó que las armas biológicas iraquíes eran el bacilo del ántrax y la toxina botulínica. (Si bien las toxinas son productos inanimados de los microorganismos, se consideran agentes biológicos, según se recoge en la convención de 1972 sobre armas biológicas.) Ambos son vulnerables a vacunas y tratamientos conocidos. Por ello la protección de las fuerzas militares se consideró una meta alcanzable. El apoyo generalizado a investigaciones que consolidaran la defensa contra estos agentes estaba garantizado.

Las pocas probabilidades que existen de repeler un ataque con agentes que no sean los tradicionales merecen un atención mayor. Parece caprichoso afirmar que la investigación podría facilitar mecanismos defensivos cuya naturaleza no se conozca con antelación. Aún más, con todas las limitaciones que pudiera tener, el coste de un sistema de defensa civil contra una agresión química o biológica sería importante. Un informe elaborado en 1969 por las Naciones Unidas indicaba que el coste de proveer de máscaras antigás, antibióticos, vacunas y de otras medidas defensivas

para los civiles podría superar los 20.000 millones de dólares. Si corregimos la cifra según la inflación, actualmente estaríamos hablando de 80.000 millones.

Vacunas y equipos protectores son algunos de los desafíos que plantea la defensa biológica, pero no los únicos. Resulta problemática, por ejemplo, la identificación de un microorganismo en el mismo campo de batalla. Incluso la determinación de si se ha producido o no un ataque puede ser incierta. Por ello, el Pentágono ha empezado a centrar sus investigaciones en la detección.

En mayo de 1994 el vicesecretario de Defensa John Deutch presentó un informe sobre actividades contra la proliferación de armamento de destrucción masiva preparado por varios grupos de la administración norteamericana. En él se afirmaba que, en particular, no se estaban investigando adecuadamente los detectores de agentes biológicos. El informe recomendaba que se incrementara en 75 millones de dólares los 110 presupuestados para el desarrollo de la detección de armamento biológico y químico. Ya estaban en marcha programas subvencionados por el Pentágono y que incluían la espectrometría de masas de trampa iónica y la espectroscopía de ruptura inducida por láser, técnicas que se basan en las características químicas de los agentes peligrosos presentes en el aire. El ejército cifra sus esperanzas en encontrar un detector genérico, capaz de identificar clases de patógenos, si bien reconoce que se encuentra aún muy lejos de su objetivo.

En paralelo, el ejército está también ponderando otro enfoque más limitado basado en la identificación de agentes específicos gracias a combinaciones del tipo antígeno-anticuerpo. El "sistema de detección biológica integrada" (BIDS) expone muestras de aire sospechosas a anticuerpos específicos que reaccionan con un agente biológico determinado. Una reacción positiva, proceso que dura unos 30 minutos, para un anticuerpo dado implica la presencia del agente correspondiente en el ambiente.

Mediante reacciones antígeno-anticuerpo, BIDS reconoce ya cuatro tipo de agentes: *Bacillus anthracis* (bacilo del ántrax), *Yersinia pestis* (productora de la peste bubónica), la toxina botulínica (el veneno liberado por los bacilos implicados en el botulismo) y la enterotoxina B estafilocócica (que fabrican algunas cepas de estafilococos). Están en desarrollo investigaciones de laboratorio que permitan la identificación de otros agentes mediante reacciones antígeno-anticuerpo, pero son cientos los organismos y las toxinas que pueden, en principio, convertirse en armas biológicas. Se ignora cuál puede llegar a ser el espectro de gérmenes que BIDS sea capaz de identificar.

La medida más eficaz contra la guerra y el terrorismo biológicos es, y será, la prevención. A tal efecto, importa potenciar los servicios de información y el control de los suministros comerciales de patógenos. El plan antiterrorista presentado a principios de 1996 ya contempla ambas iniciativas. También generan interés los intentos de identificación y control de enfermedades emergentes. ProMED ("Programa de Control de Enfermedades Emergentes") es uno de estos intentos y fue propuesto en 1993 por la Federación de Científicos Norteamericanos, que cuenta con tres mil miembros.

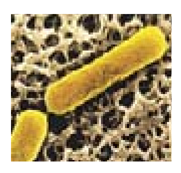
Los responsables de ProMED se proponen investigar la aparición brusca de enfermedades en general, sin cerrar los ojos a la posibilidad de epidemias producidas por el hombre. El sistema de vigilancia de ProMED incluirá la creación de una base de datos de las enfermedades endémicas de todo el mundo, la advertencia inmediata de la aparición de brotes no habituales y medidas orientadas a controlar la enfermedad, tales como asesoramiento médico del comercio y de los viajes. Un programa de estas características permitiría una detección más eficaz de los brotes malignos causados por grupos hostiles.

Asimismo deberían darse los pasos necesarios para hacer más estricta la Convención de 1972 sobre Armas Biológicas mediante procedimientos de verificación que incluyeran inspecciones *in situ*. En la conferencia de 1991 se designó un comité que estudiara tales medidas. VEREX, anagrama del comité, elaboró una lista con varias posibilidades, desde el control de la bibliografía científica hasta la realización de inspecciones *in situ* en áreas potencialmente productoras, tales como laboratorios, empresas farmacéuticas o fábricas de cerveza. Del 25 de noviembre al 6 de diciembre de 1996 se celebró en Ginebra otra conferencia de revisión, en la que, pese a los avances, no se logró introducir de la verificación *in situ* del cumplimiento de los acuerdos. Se retrasó para la conferencia de 1998 la creación de un protocolo donde podría hallar cabida esa cautela.

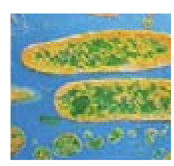
Agentes biológicos potenciales



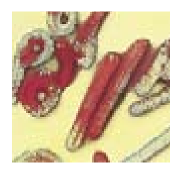
***Bacillus anthracis*.** Produce ántrax o carbunco. Tras inhalación de las bacterias, los síntomas tardan unos dos o tres días en desarrollarse. Los síntomas iniciales son compatibles con los de una infección respiratoria común, pero luego siguen fiebre alta, vómito, dolor articular, respiración fatigada y lesiones hemorrágicas internas y externas. La exposición puede ser fatal. La vacuna y los antibióticos ofrecen protección suficiente, a menos que la exposición sea alta.



Toxina botulínica. Liberada por la bacteria *Clostridium botulinum,* produce botulismo. Los síntomas aparecen a las 12-72 horas después de la ingesta o inhalación y se inician con náuseas y diarrea, seguidos de debilidad, sensación de vértigo y parálisis respiratoria que a menudo acarrea la muerte. La antitoxina detiene a veces el proceso.



***Yersinia pestis*.** Produce la peste bubónica, la Peste Negra de la Edad Media. Si las bacterias llegan al pulmón, los síntomas (fiebre y delirio) pueden aparecer en tres o cuatro días. Los casos que no se tratan tienen casi siempre un desenlace fatal. Las vacunas proporcionan inmunidad y los antibióticos suelen ser eficaces si se administran precozmente.



Virus Ebola. Muy contagioso y letal. Su incierta estabilidad fuera del huésped animal hace que no sea deseable como agente biológico. Los síntomas aparecen dos o tres días después del contacto: fiebre alta, delirio, artritis severa, hemorragias por los orificios naturales y convulsiones. El cuadro desemboca en la muerte, sin que se conozca tratamiento alguno.

Dada la facilidad con que se pueden fabricar armas biológicas, siempre será posible que ciertos individuos contravengan los acuerdos internacionales. Pero su ausencia de los arsenales nacionales y la estricta regulación de la adquisición y transferencia de patógenos hará más difícil su obtención con fines criminales. La verificación no podrá ser nunca exhaustiva; por eso, algunos críticos opinan que los procedimientos de verificación constituyen una pérdida de tiempo. Los que están a favor de tales procedimientos argumentan que las sanciones que sigan a las violaciones detectadas pueden tener cierto efecto disuasorio y que esto es preferible a que no haya sanciones en absoluto. Aún más, un acuerdo global estricto debería obligar a las naciones del mundo a no traficar con ese armamento.

Existen varias circunstancias que explican el uso infrecuente de las armas biológicas hasta la fecha. Algunos usuarios potenciales probablemente no están familiarizados con la lucha bacteriológica. Incluso es posible que teman infectarse ellos mismos. La naturaleza imprevisible de los agentes biológicos puede haber tenido un efecto disuasorio para las naciones y para los terroristas. Las mutaciones pueden hacer que un virus o una bacteria incremente o pierda su virulencia, lo que puede suponer un revés a la estrategia de quien los diseminó. Una última razón nada desdeñable es que, una vez liberado en un medio, el patógeno puede infectar a cualquiera que en él penetre, lo que dificulta la ocupación del territorio.

Junto a estas razones de índole práctica existe otra que requiere un énfasis mayor del que es objeto habitualmente: la repugnancia moral que inspiran estas armas. Su capacidad de producir un sufrimiento grande, junto a su carácter indiscriminado, contribuyen a la aversión profunda, asentada muy dentro, que la mayoría de las personas sienten por ellas. Y esta repulsión explica el escaso uso de las armas biológicas en el pasado. Contrariamente a los análisis que habitualmente ignoran o minimizan este fenómeno, tal antipatía natural debe apreciarse en su justa magnitud y sacársele partido. Incluso es posible que algunos terroristas se resistan a usar armas que acabarían por poner a la gente definitivamente en contra de su causa.

En sintonía con estos sentimientos, la convención de 1972 sobre armas biológicas considera el armamento biológico “repugnante para la conciencia del hombre”. Las raíces de este pensamiento se hunden miles de años. (Hasta el siglo XIX no se supo que los microorganismos causaban infecciones; se suponía que el veneno y la enfermedad participaban de una misma realidad. En latín, “veneno” se dice “virus”.)

En muchas civilizaciones estuvieron prohibidos el envenenamiento de comida y de pozos, así como el recurso a las armas emponzoñadas. Griegos y romanos condenaron el uso de venenos en la guerra por ser violación del *ius gentium* (derecho de gentes). Los venenos y otros tipos de armas reputadas inhumanas quedaron prohibidos por la ley Manu en India, alrededor del 500 a.C. y entre los sarracenos mil años después. Hugo Grotius, filósofo holandés del derecho, reiteró estas prohibiciones en su obra de 1625 *La ley de guerra y de paz*, y se acataron, en su mayor parte, en los encendidos conflictos religiosos de la época.

Como los tabúes de incesto, canibalismo y otros actos repudiados, el tabú del veneno se ha violado en ocasiones. Pero la frecuencia de tales violaciones puede haberse reducido gracias a su castigo como “apropiación fraudulenta de derechos naturales”, en palabras del jurista inglés Robert P. Ward, que vivió a caballo de los siglos XVIII y XIX. En el marco del derecho de gentes, Ward escribió: “Nada está más expresamente prohibido que el uso de armas *envenenadas*” (el subrayado es del original).

El historiador John Ellis van Courtland, profesor emérito de la Universidad estatal de Fitchburg, explica cómo el auge del ideario nacionalista en el siglo XVIII arrinconó el pensamiento contrario al empleo militar de los venenos. Como resultado de lo que Moon denomina “nacionalización de la ética”, las necesidades militares terminan por desplazar a las consideraciones morales en el gobierno de los países. En estado de guerra, las naciones se disponen a emplear cuanto esté a su alcance para lograr sus fines.

A mediados del siglo XIX algunos jefes militares propusieron el empleo de armas tóxicas, sin que se llegara llevar a práctica. Sí se empleó, en cambio, el gas mostaza en la primera guerra mundial. La experiencia de una guerra química a gran escala fue tan estremecedora, que condujo al protocolo, firmado en 1925 en Ginebra, por el que se prohíbe el uso de agentes químicos y bacteriológicos en la guerra. Las imágenes de las víctimas, que morían respirando convulsivamente hasta la asfixia y echando espuma por la boca, tuvo un impacto muy profundo. El texto del protocolo refleja el sentido global de repulsa. Así se afirma que el uso de estas armas ha sido “justamente condenado por la opinión general del mundo civilizado”.

En ninguna de los cientos de guerras o escaramuzas que les siguieron se utilizaron armas químicas o biológicas, hasta que Irak las empleó



3. EN UN LABORATORIO de máxima seguridad del Instituto Médico de Investigación de Enfermedades Infecciosas de Maryland, se estudian agentes biológicos y defensas potenciales.

extensamente durante la guerra Irán-Irak. Lamentablemente, la respuesta internacional al comportamiento iraquí fue, si no nula, ineficaz. Desde 1983 hasta el final de la guerra en 1988, a Irak se le permitió proseguir con el asesinato químico. El miedo a que fuera Irán el que ganara la guerra acalló protestas más enérgicas contra un tipo de arma que había ya recibido la repulsa universal.

Las consecuencias de este silencio ante el comportamiento iraquí fueron, no por desafortunadas, menos previsibles. La habilidad iraquí para hacer uso de su arsenal químico con impunidad y su aparente eficacia contra Irán movieron a varios países a potenciar su arsenal químico y biológico. Por ironía de las cosas, en 1991 algunos de los países que habían optado por el silencio sobre los ataques químicos iraquíes tuvieron que enfrentarse en el campo de batalla con un ejército iraquí armado química y biológicamente.

Defensas contra las armas biológicas

Máscara respiratoria o de gas. Los filtros, normalmente de carbón activado, han de bloquear las partículas mayores de un micrometro. Los trajes apropiados también son útiles para proteger del contacto a través de heridas abiertas u otro tipo de discontinuidades de la piel.

Refugio. Lo mejor es un habitación cerrada, aislada con un recubrimiento plástico o de cualquier otro material aislante y ventilación con aire filtrado.

Descontaminación. Se pueden esterilizar superficies con desinfectantes tradicionales como el formaldehído.

Vacunación. Para un agente específico. En algunas ocasiones son precisas varias inoculaciones en un extenso período de tiempo antes de conseguir inmunidad frente al agente. Para muchos agentes no se conoce vacuna.

Antibióticos. Son eficaces frente algunas bacterias, pero no frente a todas. (Ineficaces contra los virus.) Algunas bacterias susceptibles obligan a tratamiento precoz en las primeras horas tras el contacto, antes de que aparezcan los síntomas.

Sistemas de detección. Sólo se dispone de unidades de campo muy rudimentarias para algunos agentes específicos. Se están desarrollando investigaciones orientadas a incrementar el número de agentes detectables en el campo de batalla o en cualquier otra situación.

Desde la guerra del golfo Pérsico, gran parte de la comunidad internacional ha presionado a Irak por sus programas de armamento no convencional mediante las sanciones decididas por el Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas. Las resoluciones del Consejo incluyen la destrucción del arsenal biológico iraquí (y de otras armas de aniquilación masiva), así como la entrega de información sobre programas pasados que sirvieron para desarrollarlo. Irak ha colaborado sólo parcialmente y los inspectores de la ONU siguen esperando que se completen las revelaciones.

Pero incluso ahora, los informes de la ONU son, por lo común, proclamas escuetas. Las expresiones de indignación son raras. Cualquier país o grupo que fabrique este tipo de armamento merece una severa condena. Se necesita que haya algo que nos recuerde permanentemente que las personas civilizadas ni usan ni trafican con estas armas. A tal efecto debería ser de ayuda el acuerdo alcanzado por EE.UU. y Rusia, por el que ambos países se comprometen a destruir sus arsenales químicos en el plazo de diez años.

Evidentemente las palabras de indignación no bastan por sí solas. Es importante mantener un servicio adecuado de información, como también lo son los controles sobre los envíos interiores e internacionales de patógenos y la vigilancia de brotes de enfermedad. Además, son esenciales instituciones que refuercen las conductas y los valores positivos.

Actualmente se considera prioritaria en este último aspecto la observación de lo recogido en la Convención sobre Armas Químicas, por la que se prohíbe su posesión. Se ha elaborado una lista de productos químicos de obligada declaración para los países firmantes. A diferencia de la Convención sobre Armas Biológicas, están previstas medidas para la verificación de su cumplimiento, entre las que se encuentran inspecciones de supuestas violaciones avisadas con poca antelación. También existen incentivos para los países adheridos, como participar de intercambios de información o privilegios comerciales.

El tratado químico se abrió para su firma en 1993. En octubre de 1996 ciento sesenta países habían firmado el texto y sesenta y cuatro lo habían ratificado, uno menos del número requerido para que el tratado entrara en vigor. Un punto de desacuerdo apartó a EE.UU. del pacto. En parte por disconformidad sobre las medidas de verificación previstas, el Senado ha demorado la incorporación.

El desarrollo del tratado sobre armas químicas sería oportuno para endurecer las resoluciones sobre armas biológicas. De otra manera, el fracaso en el cumplimiento de las expectativas planteadas por la convención sobre armas químicas no favorecería la aprobación de medidas encaminadas a la verificación del tratado sobre armamento biológico. La consecuencia más probable sería la proliferación mundial de arsenales químicos y biológicos. Cuanto más tiempo persistan estas armas, tanto más irán perdiendo el sentido de ilegitimidad y tanto más probable será su uso militar o en actos de terrorismo.

Como han señalado los analistas, los grupos subnacionales a menudo recurren al mismo armamento existente en los arsenales nacionales. Por ello, la ausencia de armamento químico y biológico de los arsenales militares nacionales puede disminuir su atractivo para los terroristas. Según el experto antiterrorista Brian M. Jenkins, los líderes de Aum Shinrikyo señalaron que fue el uso de productos químicos por parte de Irak en su guerra contra Irán lo que despertó su interés por las armas químicas.

Tratados, regímenes de verificación, control global, supervisión del intercambio de patógenos —en todos ellos se cifra el control de este armamento. Su eficacia depende en última instancia del fondo moral que los sustenta y del deseo de potenciarlos rigurosamente.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BIOLOGICAL WEAPONS: WEAPONS OF THE FUTURE? Dirigido por Brad Roberts. Center for Strategic and International Studies, 1993.

BIOLOGICAL WARFARE IN THE 21ST CENTURY. Malcolm Dando. Macmillan, 1994.

THE ELEVENTH PLAGUE: THE POLITICS OF BIOLOGICAL AND CHEMICAL WARFARE. Leonard A. Cole. W. H. Freeman and Company, 1996.

El deuterio primordial y la gran explosión

Los núcleos de este isótopo del hidrógeno se formaron en los primeros momentos tras la gran explosión. Su abundancia nos introduce en la evolución del universo primitivo y nos desentraña la naturaleza de la materia oscura del cosmos

Craig J. Hogan

El modelo del universo primitivo que se basa en la gran explosión ("big bang") es sencillísimo. De acuerdo con el mismo, el universo incipiente carecía de cualquier tipo de estructura a escalas mayores que las partículas elementales. Sus predicciones se rigen sólo por la relatividad general, el modelo estándar de la física de las partículas elementales y las reglas de distribución de la energía de la termodinámica fundamental; no obstante, describe casi a la perfección la bola de fuego primordial.

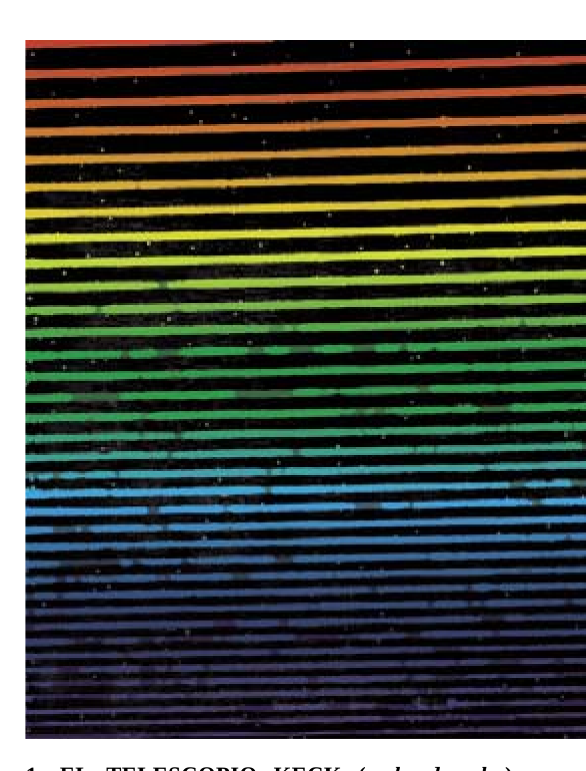
Los núcleos atómicos que se engendraron durante los primeros segundos y minutos del universo nos hablan de lo que sucedió en los balbuceos del universo y de su composición y estructura actuales. La gran explosión generó un universo hecho casi exclusivamente de hidrógeno y helio. El deuterio, isótopo pesado del hidrógeno, sólo se formó al principio del universo; es, por tanto, un testimonio muy importante de las circunstancias de entonces. La razón entre el número de átomos de deuterio y el de átomos de hidrógeno ordinario depende de la cantidad total y de la uniformidad de la materia que se creó durante la gran explosión. A lo largo de los últimos años se han logrado, por fin, mediciones fidedignas y directas del deuterio presente en las nubes de gas más viejas. Cabe esperar que sus resultados ofrezcan una contrastación precisa de la cosmología de la gran explosión.

Parece que la expansión del universo empezó hace entre diez y veinte mil millones de años. Estaba entonces todo mucho más junto, todo era mucho más denso y caliente. Cuando el universo sólo tenía un segundo, su temperatura pasaba de los 10.000 millones de grados, es decir, era mil veces más caliente que el centro del Sol. A esa temperatura no era tan tajante la distinción entre unas y otras formas de materia y energía como en las condiciones actuales: los protones y los neutrones se transformaban continuamente entre sí, "cocinados" por sus interacciones con una plétora de electrones, positrones y neutrinos de gran energía. Los neutrones son un poco más pesados que los protones; a medida que el universo se fue enfriando, la mayor parte de la materia tomó la forma más estable, el protón: cuando la temperatura bajó de los 10.000 millones de grados y la intertransmutación cesó, había unas siete veces más protones que neutrones.

CRAIG J. HOGAN estudia los lindes del universo visible. Dirige el departamento de astronomía de la Universidad de Washington. Tras doctorarse en la Universidad de Cambridge, prosiguió su formación en la de Chicago y en el Instituto de Tecnología de California.

Hecho en el horno primordial

Cuando el universo contaba apenas unos minutos (y su temperatura era de unos 1000 millones de grados), los protones y los neutrones estaban ya lo bastante fríos para unirse y formar núcleos. Cada neutrón encontró un protón que lo acompañase; se crearon así los deuterones. Casi todos éstos, a su vez, se juntaron dos a dos y construyeron —dos protones, dos neutrones— los núcleos de helio. Con el helio primordial ya constituido, la densidad del universo era demasiado pequeña



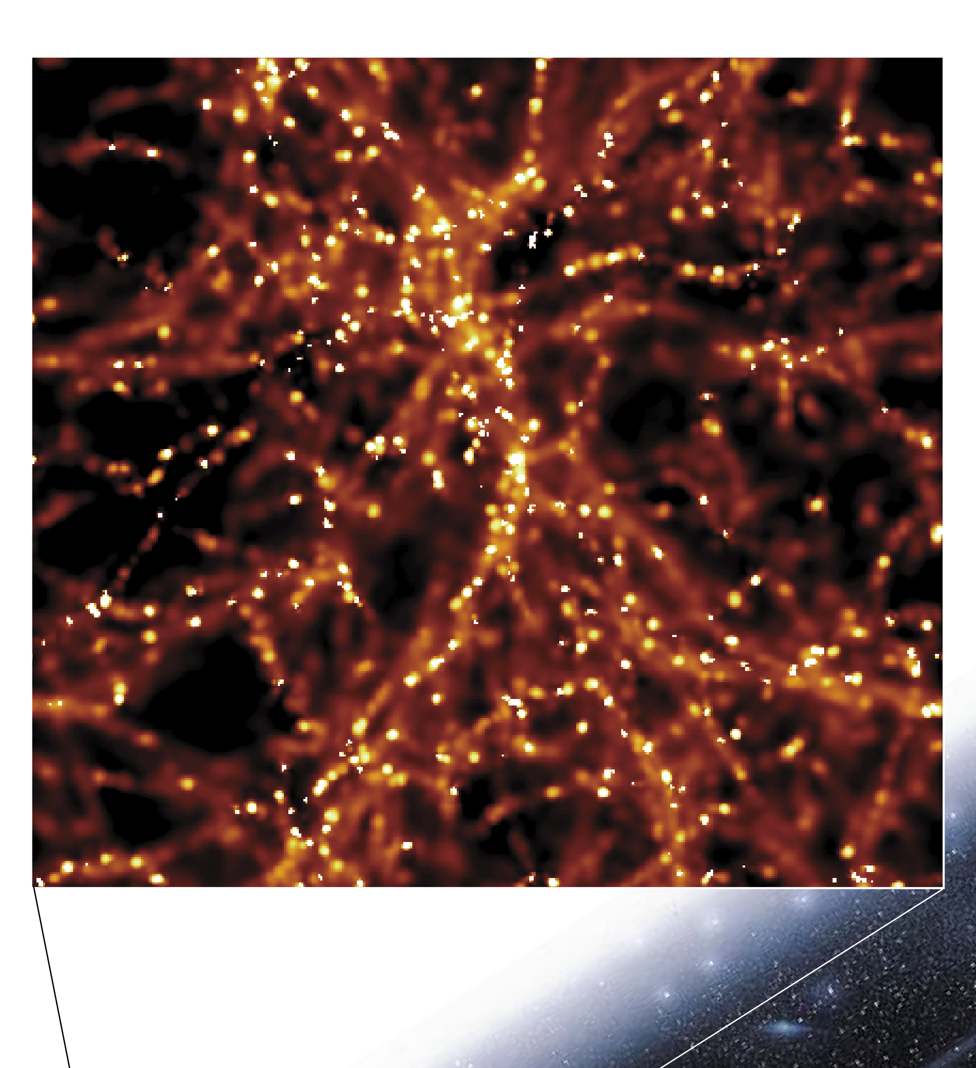
1. EL TELESCOPIO KECK (*a la derecha*), instalado en Mauna Kea, recogió la luz procedente de un cuásar distante y la concentró en el fotodetector de un espectroscopio de alta resolución. Las bandas de color resultantes (*arriba*) están definidas por las líneas oscuras que las separan, correspondientes a las longitudes de onda que han absorbido los gases interpuestos. El análisis de los patrones de líneas característicos del gas hidrógeno revela la presencia de su isótopo pesado, el deuterio.



para que nuevas fusiones produjeran elementos más pesados en el tiempo disponible. En consecuencia, casi todos los neutrones quedaron incorporados en el helio.

Sin neutrones que los mantuviesen unidos, los protones no podían, a causa de su repulsión eléctrica, asociarse y formar núcleos. A causa del número limitado de neutrones en la bola de fuego primordial, seis de cada siete protones tuvieron, pues, que seguir siendo núcleos aislados de hidrógeno. Por eso, el modelo de la gran explosión predice que alrededor de una cuarta parte de la masa de la materia normal del universo consta de helio y las otras tres cuartas partes de hidrógeno. Esta sencilla predicción concuerda muy bien con las observaciones. Por ser la fuente principal de energía de las estrellas del universo, el predominio del hidrógeno explica que las estrellas y el Sol luzcan.

Durante la formación de los núcleos de helio quizá sólo uno de cada 10.000 deuterones quedó desparejado. Una fracción aún menor se fusionó, creando un núcleo más pesado que el de helio, el del litio. (Los demás elementos, como el carbono y el oxígeno, se produjeron mucho más tarde, en el interior de las estrellas.) Los porcentajes exactos del helio, el deuterio y el litio dependen de un solo parámetro: la razón entre el número de protones y neutrones —unos y otros encuadrados en la categoría de los bariones— y el número de fotones. El valor de esa razón, η (la letra griega eta), se mantiene en esencia constante a medida que el universo se expande; como podemos medir el número de fotones, si supiésemos cuánto vale η sabríamos cuánta materia hay. Esta cifra es importante para comprender la evolución ulterior del universo, porque podemos compararla con la cantidad real de materia, la vista en las estrellas y en el gas de las galaxias, así como la cantidad mayor de materia oscura no observada.



Para que la gran explosión construyese la mezcla de elementos ligeros

2. MEDIR LA CONSTITUCION del universo primitivo es difícil porque dentro de las estrellas se ha transmutado mucha materia. La radiación de los cuásares, distantes miles de millones de años luz, en los límites de lo observable, ofrece, no obstante, una forma de hacerlo. Hace mucho esa luz atravesó nubes de gas primordial bastante puro, situadas posiblemente en los aledaños de galaxias en formación (en el recuadro de la izquierda se muestra un modelo por ordenador de una nube de gas primordial). El hidrógeno y el deuterio de estas nubes suprimen ciertas longitudes de onda de la luz características; esos cambios pueden detectarse y medirse en la Tierra.

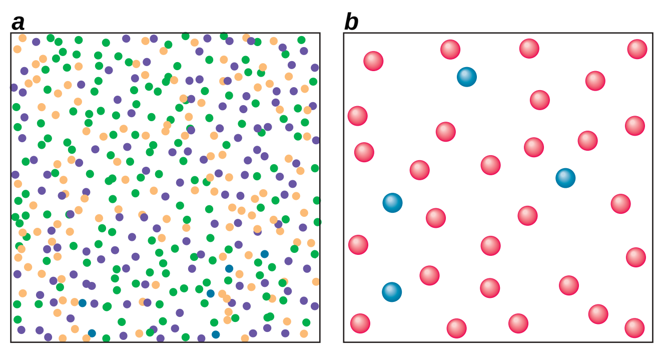
que se observa, η había de ser muy pequeña. El universo tiene menos de un barión por cada mil millones de fotones. La temperatura de la radiación cósmica de fondo nos dice directamente el número de fotones que quedaron tras la gran explosión; en el presente hay unos 411 por centímetro cúbico de espacio. Por tanto, la densidad de los bariones debería ser de algo menos de 0,4 por metro cúbico. Aunque los cosmólogos saben que η es pequeña, las estimaciones de su valor exacto varían en estos momentos en un factor de casi diez. Los indicadores más precisos y fiables de η son las concentraciones de los elementos ligeros primordiales, en particular el deuterio. Una η quintuplicada, digamos, se manifiesta en una cantidad de deuterio creada 13 veces menor.

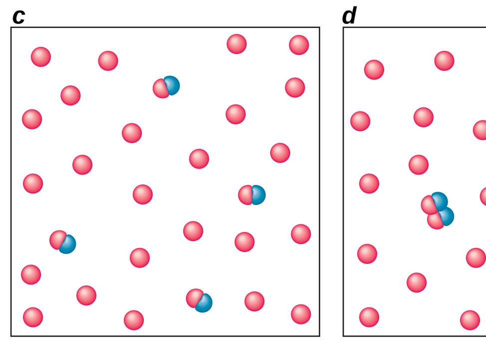
La mera existencia del deuterio pone un límite superior a η porque la gran explosión constituye, con toda probabilidad, la fuente primaria del deuterio en el universo; el procesamiento posterior en las estrellas sólo lo destruye gradualmente. Al deuterio se le puede considerar, como al carbón de leña, un combustible a medio consumir, que subsiste aún porque no dio tiempo a quemarlo por completo antes de que el fuego original se enfriase. La nucleosíntesis duró en la gran explosión escasos minutos, pero la combustión nuclear persiste en las estrellas durante millones o miles de millones de años; por eso, en ellas todo el deuterio se convierte en helio o en elementos más pesados. Cualquier átomo de deuterio que hallemos será, pues, un residuo de la gran explosión, hasta el que sustituye al hidrógeno en una molécula de cada diez mil de agua de mar.

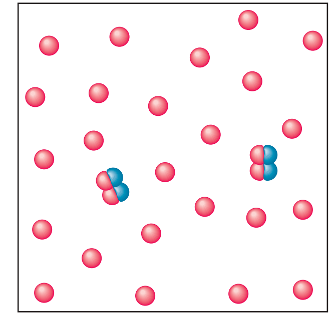
Cuásares y nubes de gas

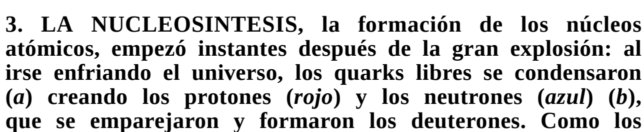
La determinación de la razón primordial entre el deuterio y el hidrógeno ordinario, que sería muy esclarecedora, no resulta fácil. El universo no es hoy tan sencillo como ayer. Los astrónomos pueden medir el deuterio de las nubes de gas hidrógeno atómico existentes entre las estrellas de nuestra galaxia, pero la fragilidad del elemento hace que el resultado sea dudoso. Vivimos en una galaxia de edad mediana, contaminada, disipada, cuyos gases han experimentado una larga historia de diez mil millones de años de procesamiento químico. El deuterio se destruye muy fácilmente en las estrellas, hasta en sus capas exteriores o en la primera etapa, preestelar, de su evolución. Las estrellas, además, al morir expulsan sus envolturas: el gas de nuestra galaxia ha entrado y salido de ellas muchas veces. La observación de las nubes de gas cercanas sólo nos proporciona, pues, una cota inferior de la cantidad de deuterio primordial.

Sería mucho mejor recurrir a un material primigenio que se hubiera mantenido siempre intacto, que nunca haya sufrido una evolución química. No podemos llevar tal muestra al laboratorio, pero sí descubrir su composición mediante el efecto que tenga en el espectro de la luz procedente de fuentes remotas. Los cuásares, brillantes, los objetos más luminosos del universo, están tan lejos que la luz que vemos ahora partió de ellos cuando el universo sólo tenía de un sexto a un cuarto de su tamaño actual y quizá sólo un décimo de su edad presente. En el camino hacia nosotros, la luz procedente de los cuásares atraviesa nubes de gas que no se han condensado aún creando galaxias maduras; la manera en que esas nubes absorben la luz nos revela la naturaleza de que están hechas. Algunas de las nubes detectadas contienen menos de una milésima de la proporción de carbono y silicio (ambos, productos de la fisión estelar) que se encuentra en el espacio cercano, buena señal de que conservan una composición muy parecida a la que tendrían justo después de la gran explosión.







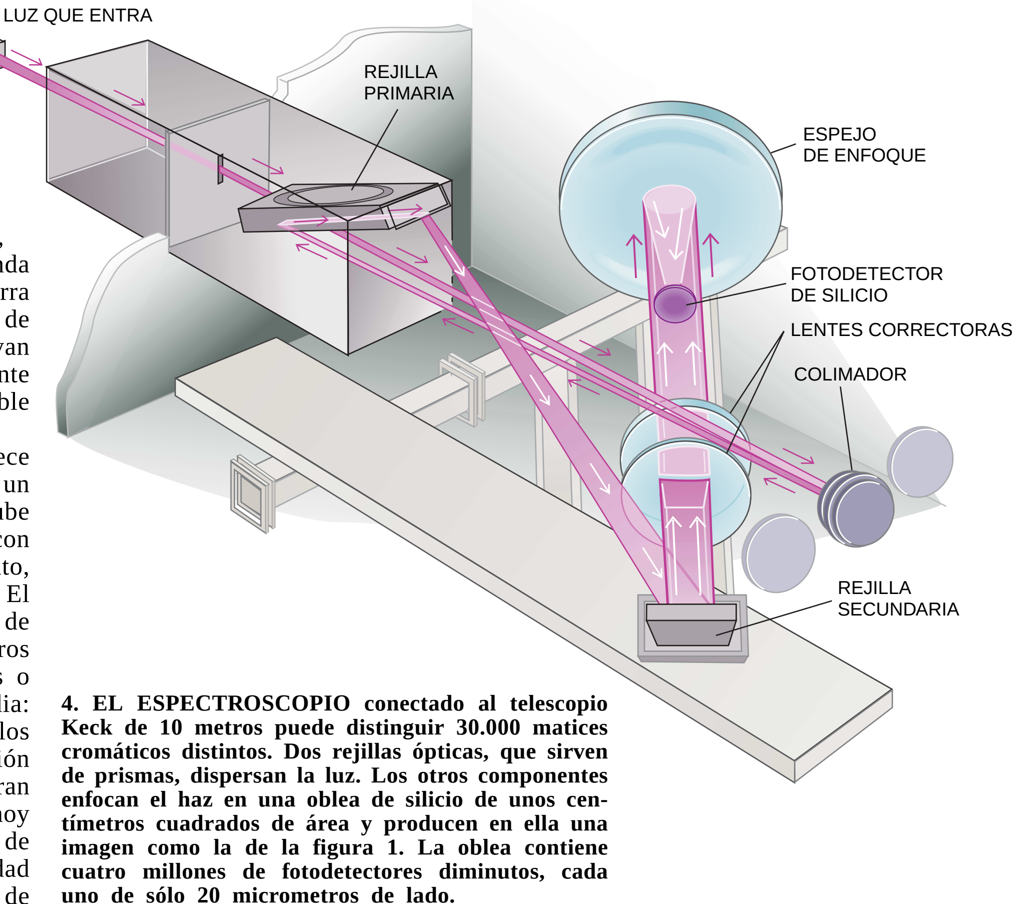


3. LA NUCLEOSINTESIS, la formación de los núcleos atómicos, empezó instantes después de la gran explosión: al irse enfriando el universo, los quarks libres se condensaron (*a*) creando los protones (*rojo*) y los neutrones (*azul*) (*b*), que se emparejaron y formaron los deuterones. Como los protones eran más numerosos que los neutrones, la mayoría permanecieron solos, es decir, se convirtieron en los núcleos de hidrógeno (*c*). Casi todos los deuterones se combinaron a su vez y produjeron núcleos de helio (*d*), menos un pequeño residuo, que hoy se pretende detectar.

Mirar tan lejos ofrece otra ventaja. El componente principal de esas nubes, el hidrógeno atómico, absorbe la luz en el ultravioleta a unas longitudes de onda muy precisas, la serie de Lyman. Cada una de estas líneas de absorción (se las llama así porque dejan una línea oscura en el espectro) corresponde a la longitud de onda de un fotón cuya energía sea la justa para excitar el electrón del átomo de hidrógeno hasta un nivel de energía determinado. Los colores de esas líneas caen profundamente dentro de la región ultravioleta; no se distinguen del fondo a causa de la absorción atmosférica. Hasta la más roja (y más prominente) de ellas, la línea alfa de Lyman, aparece a una longitud de onda de 1215 angstrom. Por suerte, la expansión del universo produce un "corrimiento al rojo cosmológico", que aumenta las longitudes de onda de los fotones que llegan a la Tierra hasta el punto de que las líneas de absorción del hidrógeno que se hayan creado por nubes de gas lo bastante alejadas caerán en la zona visible del espectro.

La línea alfa de Lyman aparece cientos de veces en la luz de un cuásar típico, una por cada nube que haya en la línea de visión, con un corrimiento al rojo y, por tanto, una longitud de onda distintos. El espectro resultante es un corte de historia cósmica, como lo son en otros ámbitos los anillos de los árboles o los testigos de hielo de Groenlandia: los espectros de absorción de los cuásares registran la transformación del gas uniforme salido de la gran explosión en las galaxias que hoy vemos dispersas por un volumen de espacio enorme. Esta multiplicidad de espectros ofrece otra manera de comprobar el carácter primordial del material absorbente: el modelo de la gran explosión predice que todas las nubes de gas que procedan del universo primitivo tendrán más o menos la misma composición. La medición de la concentración existente en nubes diferentes que se encuentren a una distancia muy grande las unas de las otras y de nosotros, en el tiempo y en el espacio, refrendará directamente la uniformidad cósmica.

A partir de los espectros de los cuásares podemos determinar cuánto hidrógeno ordinario y cuánto deuterio contienen algunas de esas nubes. Podemos separar la señal procedente del deuterio porque la masa extra del núcleo del deuterio aumenta la energía requerida para las transiciones atómicas en alrededor de una parte en 4000 (dos veces la razón entre las masas del protón y el electrón). El espectro de absorción del deuterio, pues, se parece al del hidrógeno de un solo nucleón, con la salvedad de que todas las líneas están corridas hacia el extremo azul del espectro en la misma



4. EL ESPECTROSCOPIO conectado al telescopio Keck de 10 metros puede distinguir 30.000 matices cromáticos distintos. Dos rejillas ópticas, que sirven de prismas, dispersan la luz. Los otros componentes enfocan el haz en una oblea de silicio de unos centímetros cuadrados de área y producen en ella una imagen como la de la figura 1. La oblea contiene cuatro millones de fotodetectores diminutos, cada uno de sólo 20 micrometros de lado.

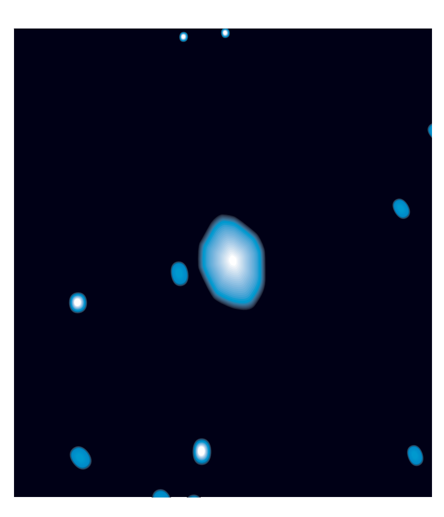
medida que produciría un movimiento de 82 kilómetros por segundo hacia el observador. El deuterio aparece en las mediciones espectrográficas de las nubes de hidrógeno como un débil “eco”, desplazado hacia el azul, del hidrógeno ordinario.

Estos espectros registran también la velocidad y la distribución de temperatura de los átomos. En virtud del efecto Doppler, que altera la longitud de onda aparente de acuerdo con el movimiento relativo de la fuente y el observador, los átomos que se mueven a velocidades diferentes absorben la luz a longitudes de onda un poco distintas también. Los movimientos térmicos aleatorios impulsan los átomos de hidrógeno a velocidades de unos 10 kilómetros por segundo, que producen un desplazamiento de la longitud de onda de una parte en 30.000; como los átomos de deuterio pesan el doble, a la misma temperatura se mueven sólo a unos siete kilómetros por segundo y tienen, por tanto, una distribución de velocidad ligeramente distinta. Un espectrógrafo moderno puede distinguir esas diferencias de las velocidades térmicas, así como flujos colectivos a una escala mayor.

Esperando la luz

A los espectrógrafos les es fácil resolver las diferencias de longitud de onda entre el hidrógeno ordinario y el deuterio. Ahora bien, el dividir la luz de un cuásar remoto en 30.000 matices de color deja muy poca intensidad para cada tonalidad. Durante más de veinte años estas observaciones resultaron demasiado difíciles. Muchos nos hemos pasado largas noches esperando que los fotones goteasen uno a uno en los detectores de los mayores telescopios del mundo para al final encontrarnos con que las perturbaciones de la atmósfera, los problemas instrumentales y la falta de tiempo habían impedido que se acumulase la luz suficiente para que el resultado fuera convincente. Hoy sí es práctico el procedimiento gracias al refinamiento de los detectores, al telescopio Keck de 10 metros de Mauna Kea y a espectrógrafos de alta resolución avanzada y gran capacidad de procesamiento, como el HIRES del Keck.

Tras muchos intentos fracasados en telescopios menores, se asignó a Antoinette Songaila y Lennox L. Cowie, colegas míos de la Universidad de Hawai, la primera noche de investigación con el telescopio Keck concedida a su universidad para que la dedicasen a este proyecto. Apuntaron el telescopio al cuásar



5. EL CUASAR 0014+813 es uno de los objetos más brillantes que se conocen en el universo. Esta imagen del objeto cuasiestelar se ha tomado con un radiotelescopio. Las primeras mediciones del deuterio primordial se efectuaron con la luz de este inmenso agujero negro situado en el centro de una galaxia muy joven, cerca de los límites del universo observable.

0014+813, famoso entre los astrónomos por su brillo (durante unos años no se conoció otro objeto más brillante en el universo). Sabíamos, gracias a los estudios de Ray J. Weymann, de los Observatorios de la Institución Carnegie de Washington, y de Frederic Chaffee, Craig B. Foltz y Jill Bechtold, de la Universidad de Arizona, y sus colaboradores, que ante ese cuásar había una nube de gas en buena medida primigenia.

La calidad del primer espectro que se obtuvo con el Keck —bastaron unas pocas horas— era ya suficiente para que se vieran en él señales aceptables del deuterio cósmico. Mostraba el patrón de absorción del hidrógeno en movimiento a distintas velocidades y un eco casi perfecto de la línea alfa de Lyman con el característico desplazamiento del deuterio hacia el azul. De la medida en que esta segunda señal se había absorbido se seguía que la nube contenía unos dos átomos de deuterio por cada 10.000 de hidrógeno. Han confirmado este resultado por su cuenta el grupo de Robert F. Carswell, de la Universidad de Cambridge, con datos del telescopio Mayall, del Observatorio Nacional de Kitt Peak, en Arizona. Los análisis posteriores han descubierto que la absorción por el deuterio exhibe una dispersión térmica de velocidades insólitamente estrecha, tal y como se esperaba.

Cabe dentro de lo posible que parte de la absorción que vimos se debiese a la interposición casual de una nube de hidrógeno pequeña que se alejara de nosotros 82 kilómetros por segundo menos que la nube principal que observamos. En tal caso, la concentración de deuterio sería menor de lo que creemos. Aunque la probabilidad *a priori* de una coincidencia así es pequeña, debemos considerar que nuestra estimación es sólo provisional. Se pueden estudiar con las nuevas técnicas las nubes absorbentes que hay ante muchos cuásares; pronto tendremos un muestreo estadístico del deuterio presente en el material primordial. Nuestro grupo y otros equipos han publicado ya las mediciones y límites de ocho nubes diferentes.

Uno de los resultados más desconcertantes es la medición de David Tytler y Scott Burles, de la Universidad de California en San Diego, y de Xiao-Ming Fan, de la Universidad de Columbia, que ha arrojado una razón casi diez veces menor que la obtenida por nosotros. Está por ver si se trata del verdadero valor primordial. La menor abundancia se podría deber a la combustión del deuterio en unas estrellas primitivas o a que la producción del deuterio no fue quizá tan uniforme como predice el modelo de la gran explosión.

Hacia la materia oscura

Si nuestro valor más alto es el correcto, la cantidad de deuterio primordial casaría muy bien con las predicciones ordinarias del modelo de la gran explosión para un valor de η de alrededor de dos bariones por diez mil millones de fotones. Con esta proporción, las predicciones de la gran explosión concuerdan también con las cantidades de litio que hay en las estrellas más viejas y con las estimaciones del helio primordial existente en las galaxias cercanas, pobres en metales. Que este resultado se confirmase sería una noticia extraordinaria: quedaría a su vez confirmado que los cosmólogos saben qué pasó sólo un segundo después de que el universo empezara a expandirse. Querría además decir que la historia de la materia a grandes distancias es igual a la de la materia cercana, tal y como se presupone en el modelo más sencillo posible del universo.

Esta evaluación de η concuerda de forma razonable con el número de bariones que vemos hoy en el universo. Con esa η y la densidad observada de fotones, tendría que haber alrededor de un átomo por cada diez metros cúbicos de espacio, y esta cifra coincide con

el número de átomos que se cuenta directamente sumando toda la materia que hay en el gas, las estrellas, los planetas y el polvo conocidos, incluidas las nubes que absorben la luz de los cuásares; no habría, pues, un gran almacén de bariones que no hayamos visto. Pero la observación enseña que la explicación de las características gravitatorias de las galaxias y de sus halos requiere una cantidad enorme de materia oscura, por lo menos diez veces la densidad media de los bariones visibles. La elevada concentración de deuterio que nos ha salido indica, en consecuencia, que esa masa no está hecha de materia ordinaria.

Se han propuesto muchas formas no bariónicas de materia que podrían aportarla. La gran explosión, por ejemplo, predice que en el universo quedan casi tantos neutrinos como fotones. Si cada uno tuviese siquiera unas milmillonésimas de la masa del protón (unos cuantos electronvolt), en conjunto aportarían al universo tanta masa como todos los bariones sumados. También es posible que el universo primitivo creara algún tipo de partícula residual que no hayamos podido producir en el laboratorio. Sea como sea, el modelo de la gran explosión, afianzado por la observación, proporciona un marco conceptual a la predicción de las consecuencias astrofísicas de esas nuevas ideas físicas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE FIRST THREE MINUTES. Steven Weinberg. Basic Books, 1977.

THE PHYSICAL UNIVERSE: AN INTRODUCTION TO ASTRONOMY. F. H. Shu. University Science Books, Mill Valley, California, 1982.

A SHORT HISTORY OF THE UNIVERSE. J. Silk. W. H. Freeman and Company, 1994.

DEUTERIUM ABUNDANCE AND BACKGROUND RADIATION TEMPERATURE IN HIGH-REDSHIFT PRIMORDIAL CLOUDS. A. Songaila, L. L. Cowie, C. J. Hogan y M. Rugers en *Nature*, volumen 368, págs. 599-604; 14 de abril, 1994.

COSMIC ABUNDANCES. ASP Conference Series, volumen 99. Dirigido por S. S. Holt y G. Sonneborn. Astronomical Society of the Pacific, 1996.

THE HISTORY OF THE GALAXIES. M. Fukugita, C. J. Hogan y P. J. E. Peebles en *Nature*, páginas 489-495; 6 de junio, 1996.

Creación de materiales nanofásicos

Las propiedades de estas sustancias con granos ultrafinos, que hallamos ahora en numerosos productos comerciales, pueden diseñarse a medida del usuario

Richard W. Siegel

En septiembre de 1989 un caballero de sienes plateadas y con dinero para invertir entró en mi despacho del Laboratorio Nacional de Argonne. Steven Lazarus, de la corporación ARCH Development, venía dispuesto a crear una empresa. Lazarus, su colega Keith Crandall y yo habíamos hablado ya largo y tendido sobre la posibilidad de establecer una compañía dedicada a la fabricación de una nueva generación de materiales. Aquel otoño, tras nueve meses de darle vueltas al asunto, Lazarus se mostraba convencido del interés comercial de la idea.

Desde 1985 venía mi grupo estudiando esos materiales. Cierto día, avanzada ya la tarde, y ante la necesidad de título para un proyecto de investigación, los bautizamos "materiales nanométricos". La expresión recogía la diferencia esencial que los separa de los materiales ordinarios. Metales, cerámicas y otros sólidos nanofásicos están hechos con los mismos átomos que sus correspondientes formas macroscópicas habituales; en aquéllos, sin embargo, los átomos se ordenan en agregados de tamaño nanométrico, que constituyen los granos o bloques estructurales de esos nuevos materiales.

RICHARD W. SIEGEL ocupa la cátedra Robert W. Hunt del Instituto Politécnico de Renssealer, cuyo departamento de ciencia e ingeniería de materiales dirige. En 1965 se doctoró en metalurgia por la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Pasó 21 años en el Laboratorio Nacional Argonne. Cofundador de la empresa Nanophase Technologies, preside el Comité Internacional de Materiales Nanoestructurados.

En los materiales comunes, el diámetro de los granos oscila entre algunos micrometros y varios milímetros; tales materiales contienen, además, miles de millones de átomos. Por contra, el diámetro de los materiales nanofásicos cae por debajo del centenar de nanómetros; constan sólo de algunas decenas de millares de átomos. Para dar cierta perspec-



tiva de estos tamaños, recordemos que un agregado de tres nanómetros de diámetro contiene alrededor de 900 átomos y es casi un millón de veces menor que el punto con el que se acaba esta frase; expresado de forma más plástica: viene a ser como un barco de unos 12 metros de eslora comparado con el tamaño de la Tierra.

En 1989 sabíamos ya algo importante. Puesto que estos granos minúsculos respondían a la luz, a los esfuerzos mecánicos y a la electricidad de un modo distinto de la forma en que lo hacían los granos de tamaño micrométrico o milimétrico, resultaba que los materiales nanofásicos en su conjunto mostraban un elenco de nuevas propiedades. Así, en punto a resistencia, el cobre nanofásico quintuplicaba al metal ordinario. Las cerámicas nanofásicas, en contraste con sus homólogas de grano grueso, resistían a la fractura. Y quizá lo que encerraba un mayor valor añadido desde el punto de vista comercial: podíamos modificar a voluntad la resistencia, el color o la plasticidad de los materiales nanométricos con sólo dominar el control del tamaño de los granos que los integran.

Basados en esas expectativas, fundé con Lazarus la empresa Nanophase Technologies Corporation en noviembre de 1989. Mi vida no volvería a ser la misma. La creación de una empresa fabricadora de estas substancias sirvió de revulsivo en el campo de la industria y en el de la ciencia. Desde entonces, nuestros expertos y los de otros centros repartidos por el globo han ahondado en el conocimiento de la naturaleza de estos materiales singulares y sus provechosas características. Gracias a ello, encontramos ahora materiales nanofásicos en productos muy dispares, desde el campo de la cosmética hasta el de la electrónica. Sus aplicaciones, qué duda cabe, se extenderán a nuevas áreas. El crecimiento de nuestra propia empresa refleja ese progreso: fabricamos ya sustancias en cantidades superiores a la tonelada, cuando hace sólo algunos años apenas si alcanzábamos miligramos en los ensayos de laboratorio.

Elaboración de mejores materiales

La historia de los materiales nanofásicos empezó al poco de iniciarse el enfriamiento que siguió a la gran explosión originaria ("big bang"), cuando la materia condensada inicial formó nanoestructuras en los primeros meteoritos. Más tarde, la naturaleza desarrolló nanoestructuras diversas, así las conchas marinas y los esqueletos que inventaron organismos de nuestro planeta. Cuando los primeros homínidos descubrieron el fuego, crearon partículas nanofásicas al generar humo. Pero la historia científica de los materiales nanofásicos arranca de mucho más tarde; podemos fechar su nacimiento en la conferencia de la Sociedad Americana de Física de 1959.

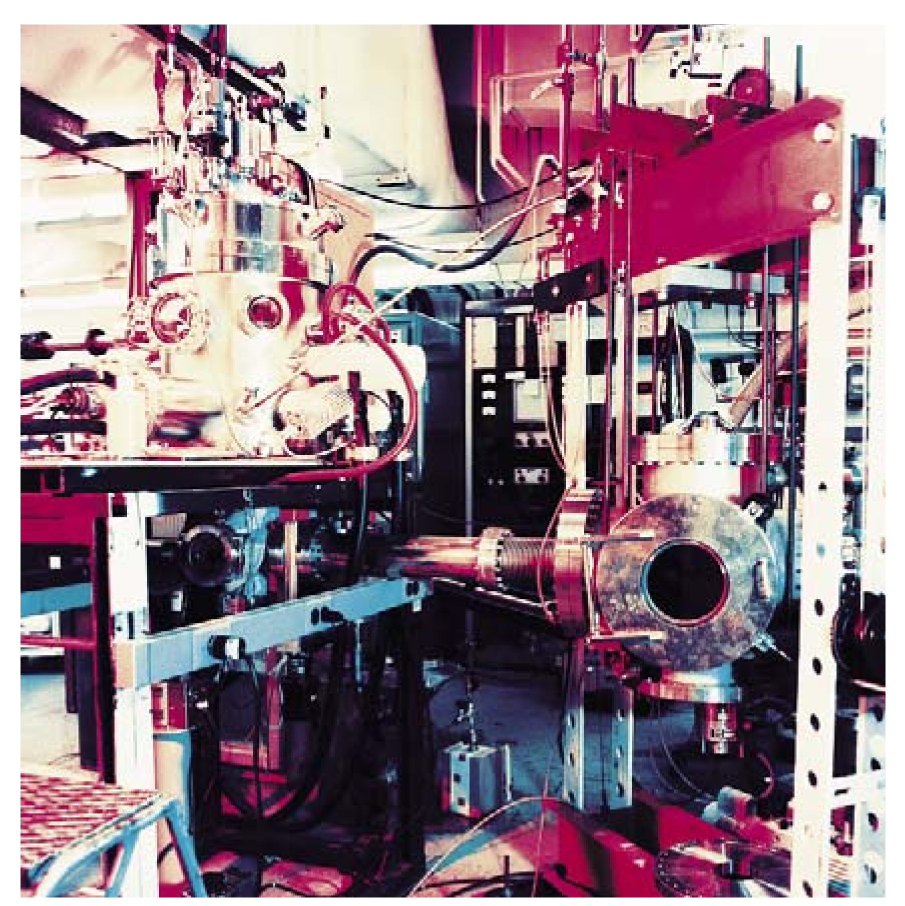
En esa reunión, el físico Richard Feynman, del Instituto de Tecnología de California, laureado más tarde con el premio Nobel, abordó los posibles efectos que se derivarían de la manipulación de minúsculos trozos de materia condensada. "No me cabe ninguna duda de que, cuando tengamos algún control sobre el ordenamiento de las cosas a una escala menor", presintió, "conseguiremos que las sustancias gocen de una gama mucho más amplia de propiedades". Las reflexiones de Feynman recibieron un pronto respaldo teórico. A principios de los años sesenta, Ryogo Kubo, de la Universidad de Tokyo, formuló un modelo para predecir el comportamiento mecánico-cuántico de agregados atómicos mínimos al confinarlos en un volumen determinado.

Aunque ese trabajo no contemplaba los efectos del confinamiento espacial en el comportamiento macroscópico (clásico) de los materiales, sí preveía la existencia de tales efectos, que más tarde descubrimos en los materiales nanofásicos. Así pues, cuando el tamaño de los bloques constructivos de estos materiales pasa a ser menor que la longitud característica asociada a cualquier propiedad, dicha propiedad cambia y podemos entonces modificarla a través del control del tamaño de los bloques.

La investigación en agregados atómicos no se interrumpió a lo largo de los dos decenios siguientes. En Japón se llevó a cabo una actividad intensa en partículas ultrafinas. Trabajos similares, aunque sometidos a secreto, se realizaron en instalaciones militares de la Unión Soviética. Verosímilmente, se ensayaban materiales consolidados, preparados con polvos ultrafinos; pero apenas si se informaba de ello.

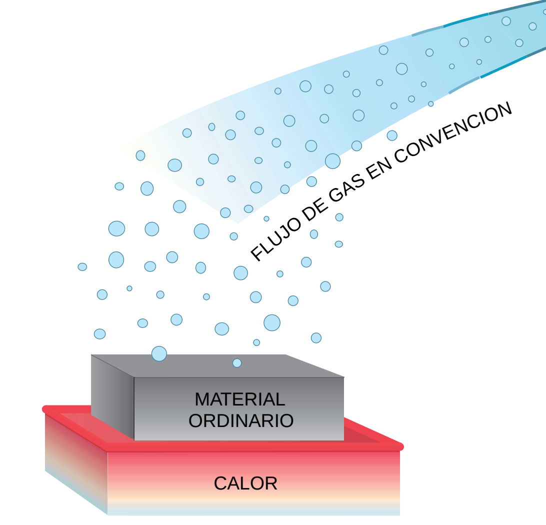
Sin embargo, en 1981 se produjo un punto de inflexión. Herbert Gleiter, adscrito entonces a la Universidad de Saarlandes, sugirió, en una reunión celebrada en el Laboratorio Nacional de Riso, que los materiales preparados mediante consolidación de partículas

1. EL COLOR y otras propiedades de los materiales nanofásicos varían de acuerdo con el tamaño de los granos o agregados que lo forman. Por ejemplo, los cuatro frascos de la izquierda contienen seleniuro de cadmio. Se trata, pues, de muestras idénticas. Sin embargo, porque tienen agregados con diferentes tamaños, cada uno presenta un tono distinto al iluminarlos con luz blanca (*izquierda*) y con luz ultravioleta (*arriba*).



2. LA PREPARACION DE MATERIALES NANOFASICOS precisa aparatos especiales, entre los que se incluyen una cámara de síntesis (*arriba a la izquierda*) y una prensa para consolidar (*abajo a la derecha*).

3. EN EL INTERIOR de la cámara de síntesis, se calienta el metal por encima de su punto de fusión, de tal forma que los átomos se evaporan desde su superficie. Estos átomos se condensan y forman agregados que se transportan por convección al tubo colector frío. Los agregados aglomerados, retirados del tubo, se consolidan en sólidos densos.



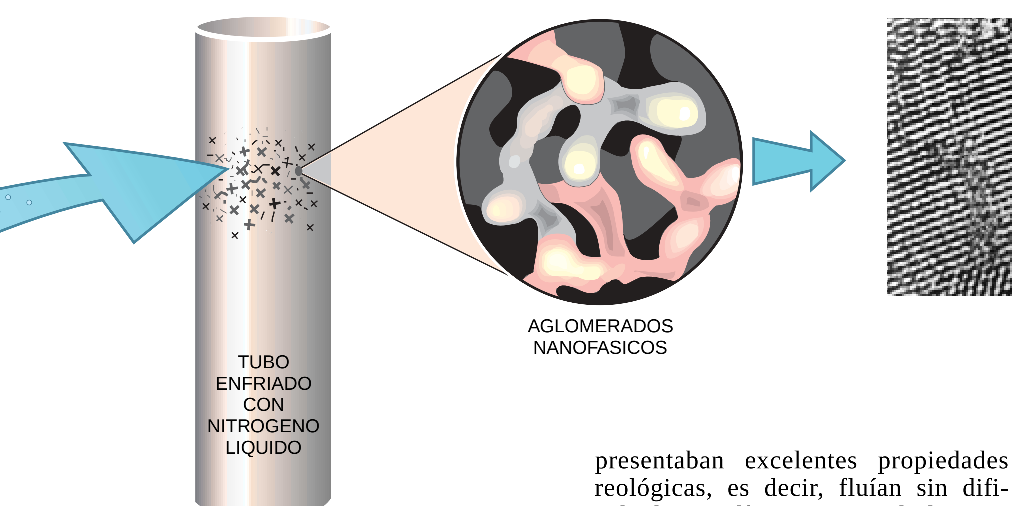
ultrafinas deberían presentar propiedades radicalmente diferentes. Después de esta conferencia, el laboratorio de Gleiter publicó varios estudios provocadores sobre los metales nanocristalinos, que provocaron mucho revuelo entre los investigadores en materiales a uno y otro lado del Atlántico.

Mi propia implicación en la nanoestructuración de materiales empezó de una manera casual en un congreso que se celebró en la India cuatro años más tarde. Me encontré allí con Horst Hahn, quien había sido alumno de Gleiter. Hahn, hoy en la Universidad de Darmstadt, se disponía entonces a iniciar una estancia posdoctoral en Argonne. Le ayudé a instalarse, proporcionándole el equipo de vacío que necesitaba para construir una cámara para sintetizar agregados atómicos. Muy pronto comenzamos a hablar sobre la posibilidad de que los polvos ultrafinos sirvieran para preparar otros materiales, además de los metales, tarea ésta a la que inicialmente había previsto dedicarse. Transcurridos escasos meses, habíamos obtenido ya una cerámica, la titania nanofásica, constituida por agregados de titanio de 10 nanómetros que habían reaccionado con oxígeno. (En su forma habitual, la titania es el blanqueador por excelencia en muchas aplicaciones, de las pinturas al papel.)

Para preparar titania nanofásica (TiO_2), adoptamos una metodología similar a la que usaban la mayoría de los expertos en Japón, la Unión Soviética, Alemania y otros lugares. La estrategia recuerda lo que ocurre cuando hierve agua en un hornillo que esté bajo una ventana fría en invierno. Con la ebullición, las moléculas de agua de la superficie se evaporan, colisionan con el aire frío del ambiente y forman condensados de humedad, constituidos por gotículas suspendidas en el aire. La convección natural desplaza el aire —y a las gotitas con él— desde el hornillo caliente hacia la ventana fría. Allí, el rimero de gotículas se congrega en cristalitos de hielo, que los niños suelen arrancar de la ventana para formar bolas de nieve.

Así también, cuando un metal llega a temperaturas iguales o superiores a la de su punto de fusión, se evaporan los átomos de la superficie del material precursor. Para crear materiales nanofásicos, se exponen luego estos átomos evaporados a un gas inerte, helio por ejemplo; el helio no reaccionará químicamente con ellos, pero los enfriará. Con este procedimiento, los átomos de helio, más fríos, dejan a los átomos evaporados sin energía, lo que determinará su condensación en pequeños agregados sólidos, cuasiesféricos. Mediante el control de la tasa de evaporación de los átomos del precursor, la elección del gas inerte y la presión, podemos fijar el diámetro de los agregados entre uno y 100 nanómetros.

Si se desea obtener un metal nanofásico, el precursor será el propio metal en su forma habitual, e impediremos que los agregados reaccionen con cualquier otro elemento en la cámara de síntesis antes de que se consoliden. Si nos interesa una cerámica, los agregados metálicos deben reaccionar con un gas apropiado —oxígeno en el caso de la titania nanofásica— antes de la consolidación de los mismos. Merced a su sencillez, este método se convirtió en la base de buena parte de nuestro trabajo. Comprobamos que, con la técnica de la condensación, podíamos crear formas nanofásicas de la mayoría de los materiales: metales, cerámicas, semiconductores, polímeros y materiales compuestos de dichas sustancias. Pero necesitábamos concentrarnos de entrada en la preparación de cerámicas y metales, hasta que supiéramos qué estaba exactamente ocurriendo.



Cerámicas nanofásicas

En los experimentos iniciales con titania nanofásica, nos importaba sobre todo conocer la respuesta de este material a la sinterización, así se llama el proceso común de manufactura a través del cual los polvos compactados se transforman en sólidos. (La sinterización ocurre a temperaturas suficientemente altas para permitir que los granos que componen el polvo intercambien átomos y se traben completamente.) Desde tiempo atrás se venía suponiendo que, si se sinterizaban polvos cerámicos con partículas ultrafinas densamente empaquetadas, el proceso podría desarrollarse a temperaturas inferiores, con lo que resultaría un sólido más compacto. Pero apareció un problema frustrante.

Antes del advenimiento de nuestro método, los polvos cerámicos con granos muy pequeños debían prepararse mediante técnicas de química húmeda, cuyos productos acostumbraban hallarse intensamente aglomerados. Ahora bien, los polvos aglomerados no podían alcanzar la plena consolidación, por cuyo motivo los sólidos sinterizados preparados con ellos carecían a menudo de la densidad debida. Los polvos nanofásicos de titania que nosotros creamos agregando átomos también estaban aglomerados, como había ocurrido en todas las cerámicas nanofásicas investigadas hasta entonces. Pero la fortuna nos ayudó. Los aglomerados mostraban la suficiente debilidad y fragilidad para que, en cualquier caso, los granos se consolidaran o se dispersaran fácilmente. Había más. Nuestros polvos con grano ultrafino presentaban excelentes propiedades reológicas, es decir, fluían sin dificultad, y podíamos manipularlos con comodidad.

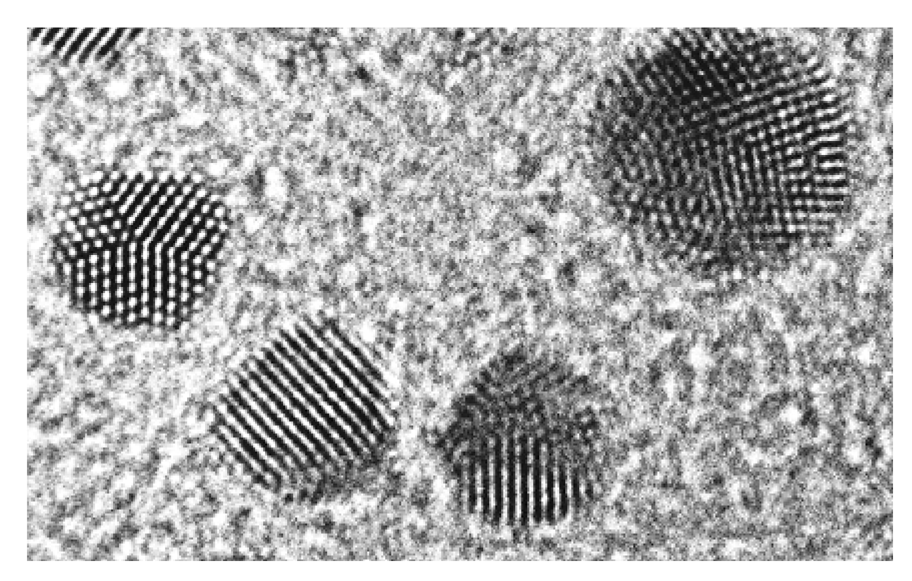
Trabajando con nuestros colegas de Argonne, Sinnanadar Ramasamy, Zongquan Li y Ting Lu, financiados por el Departamento de Energía, demostramos que el nuevo material podía sinterizarse a temperaturas que eran unos 600 grados inferiores a la temperatura requerida para sinterizar titania convencional (1400 ºC). Además, nuestra titania nanométrica sinterizada mostraba una mayor dureza y resistencia a la fractura.

Y lo que resultaba más notable, hallamos que la titania nanofásica era bastante maleable, o dúctil: se formaron a temperatura ambiente pequeños discos, conformándolos con moldes donde se llevaba a cabo el proceso de consolidación. Estos efectos observados en la titania se corroboraron en un amplio muestrario de cerámicas nanofásicas estudiadas en colaboraciones subsiguientes con Jeffrey Eastman, Alwar Narayanasamy, Youxin Liao y Uthamalingham Balachandran, compañeros nuestros también de Argonne.

En 1988 William Nix, de la Universidad de Stanford, Merrilea Mayo, entonces en el Laboratorio Nacional Sandia, y yo acometimos la realización de mediciones más precisas de deformación. Demostramos que la titania nanofásica, a temperatura ambiente, se volvía muchísimo más dúctil cuando el tamaño de grano bajaba por debajo de los 30 nanómetros. Se abría así la puerta a una nueva posibilidad de comercialización, la del conformado acabado. Por primera vez podíase moldear cantidades importantes de cerámicas nanofásicas con formas finales variables (por ejemplo, piezas de automóvil), en poco tiempo y a un coste relativamente bajo. Aún más, estas piezas resultaban más adecuadas que las piezas metálicas al uso para soportar altas temperaturas y atmósferas corrosivas, tales como las que se crean en los motores de los coches.

El equipo de Hahn, adscrito por aquellas fechas a la Universidad de Illinois, halló más tarde que la titania nanofásica completamente densa podía deformarse en compresión a temperaturas de hasta 800 ºC; el material se deformó hasta en un 60 % sin agrietarse. Estas condiciones suelen provocar fracturas catastróficas en las cerámicas tradicionales. Recientemente un equipo de la empresa Nanophase Technologies, dirigido por John Parker (en colaboración con otros equipos de Caterpillar y Lockheed y financiados por el Departamento de Comercio), ha corroborado la validez del conformado acabado para cerámicas nanofásicas, trabajo éste que facilita todavía más la aproximación comercial de los resultados iniciales.

¿A qué se debe que materiales tan quebradizos como las cerámicas se deformen de tal modo en su presentación nanofásica sin despedazarse en varios trozos? La respuesta radica en el fenómeno siguiente: bajo presión, los granos de tamaño nanométrico se deslizan entre sí mucho más fácilmente que los granos de tamaño milimétrico. El proceso fundamental —denominado deslizamiento de las fronteras de grano— es el que determina la manera en que las cerámicas nanofásicas se deforman; se parece a lo que ocurre cuando pisamos un montón de arena. En el caso de los sólidos, por contra, los granos están engarzados entre sí. Se produce fractura cuando se deshace un número sustantivo de tales enlaces. Si se abre una grieta o se insinúa una fractura, los átomos del material cercanos a la misma empezarán a desplazarse para cubrirla. Cuanto menor sea el tamaño de grano, menor resultará la distancia que deban recorrer los átomos y, en consecuencia, la reparación podrá lograrse antes. En realidad las cerámicas comunes, minerales por



4. AGREGADOS DE ORO, de unos tres nanómetros de diámetro, depositados en una lámina de carbono amorfo, tal como aparecen en el microscopio electrónico de transmisión.

ejemplo, se deforman así a lo largo de la escala de tiempo geológica, que se mide en millones de años. Pero la industria debe estar capacitada para deformar el material en una configuración determinada en cuestión de minutos o incluso menos. Lo que sólo puede hacerse con cerámicas nanofásicas.

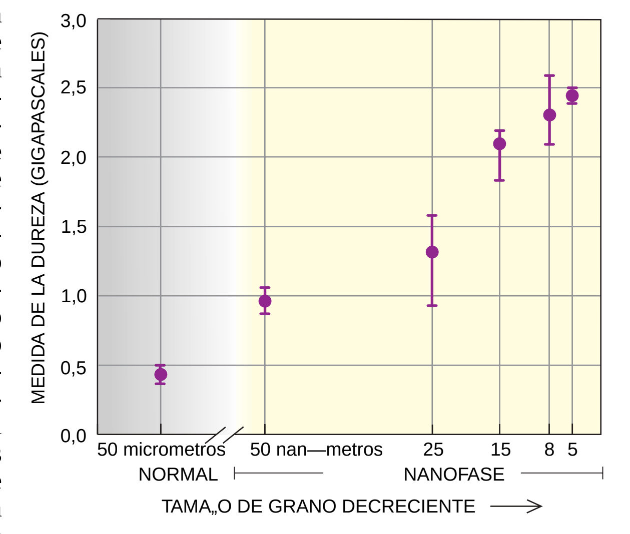
Metales nanofásicos

Mi incursión en las propiedades de los metales nanofásicos aconteció cosa de un año después de haber iniciado los trabajos sobre titania nanofásica. En 1986, en un congreso que tuvo lugar en Nueva Orleans coincidí con Julia Weertman y Johannes Weertman, ambos de la Universidad Northwestern. Hablamos sobre la resistencia de los metales nanofásicos. Dado que rebajar el tamaño de grano en los metales ordinarios significa aumentar su resistencia, ¿podrían los metales nanofásicos, con su tamaño de grano excepcionalmente pequeño, ser excepcionalmente resistentes?

Julia, G. William Nieman, becario de Northwestern, y yo nos pusimos a preparar paladio y cobre nanofásicos, amén de abordar su resistencia en función del tamaño de grano. Para determinar la resistencia de los metales medimos su dureza a través de su capacidad de deformación. De acuerdo con lo esperado, la resistencia del cobre puro aumentaba conforme decrecía su tamaño de grano. Cuando los granos alcanzaban un diámetro de 50 nanómetros, la dureza del cobre doblaba la característica del metal en su presentación ordinaria. Los granos de seis nanómetros —el menor tamaño que podíamos preparar en nuestra cámara de síntesis— proporcionaron un cobre cuya dureza quintuplicaba la acostumbrada en el cobre normal. Ulteriores investigaciones realizadas en nuestro propio laboratorio con Gretchen Fougere y Paul Sanders, doctorandos de la Universidad de Northwestern, y en otros laboratorios dispersos por el globo, confirmaron nuestros descubrimientos en muchos metales nanofásicos preparados mediante métodos diversos.

¿Qué sucedía en esos metales nanofásicos? Para descubrirlo, había que partir del proceso normal de deformación de los metales. Se me entenderá mejor con el ejemplo del movimiento de una alfombra sobre un suelo de madera. Un metal se deforma cuando los planos atómicos del cristal se deslizan el uno respecto al otro. Imaginemos que un plano es la alfombra y el otro es el suelo. Si nos limitamos a tirar de la alfombra, será muy difícil que la movamos, pues se opone la fuerza de rozamiento que opera en toda la superficie de la alfombra. Pero si creamos un pliegue transversal en un extremo de la alfombra y lo hacemos avanzar hasta el otro extremo, e iteramos esa maniobra, la tarea resulta mucho más fácil. Eso es lo que sucede con los metales, donde una dislocación en un plano de átomos vendría a ser el pliegue de la alfombra. En los metales comunes, puede impedirse el deslizamiento de las dislocaciones mediante la colocación de barreras en la trayectoria de la dislocación móvil; por ejemplo, una interfaz entre granos orientados de forma diferente (una frontera de grano).

Supusimos en un comienzo que los metales nanofásicos resistirían más porque contenían muchos granos y, por tanto, numerosas fronteras de grano que frenarían o bloquearían el desplazamiento de las dislocaciones, igual que en los metales ordinarios. La verdad resultó ser muy otra. Los granos nanométricos eran, sencillamente, demasiado pequeños para respaldar tales dislocaciones; ni las había en cuantía suficiente, ni podían engendrarse con facilidad. Mediante la observación directa por microscopía electrónica de transmisión de los agregados metálicos y las muestras nanofásicas hechas con ellos, descubrimos, y corroborarían más tarde otros grupos de investigación, que los agregados y los granos de los materiales nanofásicos apenas si presentaban dislocaciones. (En el proceso de observación contamos con la colaboración de Ronald Gronsky, del Laboratorio Lawrence en Berkeley, y George Thomas, del Laboratorio Nacional Sandia.) En ausencia de concentraciones elevadas de dislocaciones móviles, estos metales nanofásicos se



5. LA RESISTENCIA del cobre nanofásico aumenta al disminuir el tamaño de grano, como muestra la gráfica superior. Los granos nanométricos no pueden respaldar muchas dislocaciones, una característica que, en cantidades importantes, permite a los metales deformarse fácilmente.

volvieron mucho más resistentes que sus homólogos tradicionales.

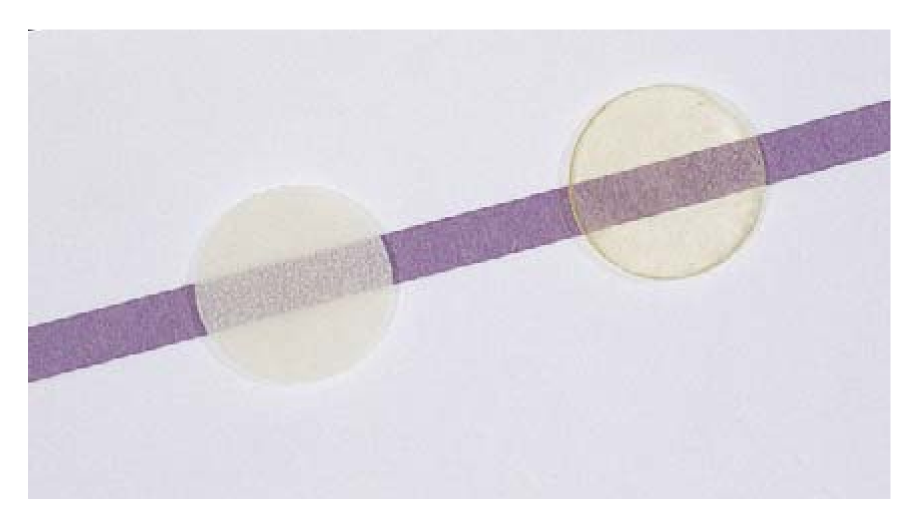
Otras propiedades a medida

Además de las propiedades mecánicas, podemos proyectar a la medida de nuestra conveniencia las características ópticas, químicas y eléctricas de los materiales nanofásicos. De nuevo, el tamaño y la disposición de los agregados o granos constituyentes desempeñan una función dominante en el control de tales propiedades. Así, las partículas con diámetros comprendidos entre 1 y 50 nanómetros resultan demasiado pequeñas para dispersar las ondas de la luz visible, cuyas longitudes se cifran entre los 380 y los 765 nanómetros. Por mor de comparación, la ineficacia de las minúsculas partículas para dispersar las ondas de luz más largas sería similar a la que mostrase una barquita para romper un oleaje oceánico. Vale, pues, afirmar que un material nanofásico consolidado puede ser transparente, si se toma la precaución de eliminar durante la consolidación cualquier poro mayor que los agregados que lo constituyen. Parker y Hahn prepararon así una forma nanofásica transparente de ytria, cerámica que en su presentación habitual es opaca.

Vayamos al caso opuesto. Las radiaciones de longitud de onda más corta (piénsese en los dañinos rayos ultravioleta) no pueden atravesar fácilmente las partículas cerámicas nanofásicas, como la titania, el óxido de zinc y el óxido de hierro. En este caso, los granos minúsculos absorben o dispersan la radiación ultravioleta de onda corta. En ese principio se funda la investigación actual en polvos nanofásicos para su aplicación en pantallas solares. Debido también a efectos de confinamiento cuántico, el color observado en algunos agregados nanométricos puede variar según su tamaño. Louis Brus, de la Universidad de Columbia, ha producido en forma de solución diversas versiones de nanofases de seleniuro de cadmio, cada una de las cuales presenta un color diferente. La verdad es que puede prepararse seleniuro de cadmio de casi cualquier color del espectro con sólo modificar el tamaño del agregado. No es otro el motivo por el que los polvos nanofásicos se están introduciendo en la industria de la cosmética.

Las aplicaciones químicas de los materiales nanofásicos ofrecen un futuro prometedor. En 1989, empecé con Donald Beck, de la compañía General Motors, a explorar el potencial catalítico de nuestros nuevos materiales. Desde hacía largo tiempo se venían utilizando partículas nanométricas de platino y rodio en funciones catalíticas, aunque con el soporte adicional de otros materiales. Beck había estudiado con anterioridad la capacidad de la titania común para eliminar el azufre de un flujo simulado de gases de escape de un coche: un flujo gaseoso que contenía sulfuro de hidrógeno. Debido a la elevada relación superficie-volumen de los pequeños agregados, las muestras nanofásicas ligeramente compactadas muestran alta porosidad y una superficie muy extensa por unidad de volumen. Intuimos que serían buenos catalizadores. No andábamos errados. Nuestra titania nanofásica dio unos resultados espectaculares. Después de siete horas a 500 grados C, la cantidad total de azufre extraída de unos gases de escape simulados quintuplicaba la removida por cualquiera de las otras formas de titania que ensayamos. Más importante aún. Tras siete horas de exposición, la tasa de extracción de azufre por la titania nanofásica seguía siendo bastante alta, mientras que el resto de las muestras, sin excepción, habían perdido ya toda eficacia.

El secreto de tal éxito se escondía en varias características de la titania nanofásica. Según lo esperado, su grano nanométrico y la elevada superficie específica resultaban muy beneficiosos. Pero lo que se demostró sumamente útil fue el que en los granos de titania faltaran iones de oxígeno. Los átomos de azufre del flujo gaseoso ocupaban fácilmente estas posiciones vacías. Esos sitios vacantes de oxígeno dieron a la titania una larga vida catalítica. Los huecos en cuestión volvían a ocuparse sin solución de continuidad conforme los átomos se difundían desde la superficie hacia el interior de los granos, dejando así en la superficie nuevas vacantes disponibles para la extracción del azufre. Las vacantes de oxígeno habían quedado perfectamente caracterizadas mediante espectroscopía Raman en nuestros experimentos con titania nanofásica en Argonne, donde conté con la ayuda de Carlos Melendres, Víctor Maroni y Parker. Cuando más tarde Parker entró en la compañía Nanophase Technologies, sería para liderar con éxito la producción en masa.



6. LAS CERAMICAS TRANSPARENTES, como la ytria de la derecha, contienen poros y agregados de un diámetro no superior a los 50 nanómetros. Las partículas y los poros mayores dispersan la luz visible y, por tanto, convierten a un material consolidado, como la ytria de la izquierda, en opaco.

Mirando hacia el futuro

Las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales nanofásicos también son controlables. Y novedosas. De ello da fe el uso generalizado de los polvos ultrafinos en los sistemas de grabación magnética. Existe actualmente una gran expectación en torno al hecho de que, en materiales nanoestructurados muy diversos, el campo magnético pueda reducir de manera importante la resistencia eléctrica. La magnetorresistencia gigante, así se llama esta propiedad, ejercerá un impacto notabilísimo en las aplicaciones de grabación magnética. Aquí, sin embargo, me ceñiré a cierta propiedad eléctrica de las cerámicas semiconductoras de óxido de zinc que se acaba de descubrir.

El óxido de zinc, en su forma policristalina habitual y dopado con cierto número de impurezas seleccionadas, es el material de base para la fabricación de resistencias que dependen del voltaje aplicado; me refiero a los varistores. En estos dispositivos elementales y de uso generalizado, la resistencia eléctrica disminuye cuando la corriente que los atraviesa aumenta en una gama muy amplia, manteniendo constante el voltaje en sus extremos e igual a cierto valor, el denominado voltaje umbral. Este comportamiento no lineal de los varistores se debe a las propiedades eléctricas de las fronteras de grano. Supuse, en consecuencia, que el óxido de zinc nanofásico —que tiene un número mucho mayor de fronteras de grano que la variedad normal— debería comportarse, en el caso de que pudiéramos prepararlo, como un material incluso mejor para fabricar varistores. Con la ayuda de mis colegas de Argonne, logré producir óxido de zinc nanofásico puro.

En colaboración con Jongtae Lee, alumno de la Universidad de Notre Dame, Thomas Mason, de la Universidad de Northwestern, y otros, he demostrado que el óxido de zinc nanofásico puro presenta comportamiento varistor. Su voltaje umbral es pequeño —alrededor de unas 40 veces menor que el habitual en materiales varistores fuertemente dopados—, pero utilizable en cualquier caso. Además, investigaciones llevadas a cabo por Ramasamy, hoy de nuevo en su Universidad de Madrás, muestran que, si el óxido de zinc nanofásico se dopa en forma similar a los varistores comerciales, puede ser incluso más útil. Debería, pues, poderse producir varistores de óxido de zinc con voltajes umbral que difieran en un factor mayor que 300. El parámetro clave para su diseño será el tamaño de grano y, por tanto, el número de fronteras de grano existentes en el material, así como la cantidad y el tipo de dopantes introducidos en dichas fronteras de grano. Se precisa aún trabajar mucho para convertir estos resultados en bienes comerciales, pero su potencial es enorme.

Aunque en este artículo nos hemos concentrado en las propiedades singulares de los materiales nanofásicos, tanto nosotros como otros investigadores hemos llevado a cabo también una amplia labor de caracterización estructural de estas substancias, una información crucial para entender sus propiedades. Hay numerosos grupos empeñados ahora en el desarrollo de nuevas técnicas de síntesis. Buscan unas la síntesis a partir de precursores atómicos o moleculares por métodos químicos o físicos, estos últimos gozan de nuestra preferencia, y otras la síntesis mediante procesado de precursores másicos, por ejemplo con técnicas de afinado de los granos por medios mecánicos o mediante cristalización de vidrios.

En general, es preferible preparar materiales nanofásicos a partir de precursores atómicos o moleculares, porque el fabricante retiene al máximo el control sobre los diversos aspectos microscópicos del material. Pero los otros métodos pueden a menudo ofrecer resultados valiosos y algunas veces con una mayor facilidad. Parece claro que los materiales nanofásicos ejercerán un papel de importancia creciente en el futuro de la técnica de materiales. Ha empezado una revolución, pero sólo podrá propagarse a medida que aprendamos a manipular la materia a escala atómica de una forma cada vez más ingeniosa y eficaz.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NANOSTRUCTURED MATERIALS MADE FROM ULTRASMALL BUILDING BLOCKS PROMISE TO ADVANCE A RANGE OF TECHNOLOGIES. R. Dagani en *Chemical and Engineering News*, volumen 70, n.º 47, páginas 18-24; 23 de noviembre, 1992.

NANOSTRUCTURED MATERIALS: MIND OVER MATTER. R. W. Siegel en *Proceedings of the First International Conference on Nanostructured Materials*. Dirigido por M. José Yacamán, T. Tsakalakos y B. H. Kear en *Nanostructured Material*, volumen 3, n.os 1-6, páginas 1-18; 1993.

NANOPHASE MATERIALS. R. W. Siegel en *Encyclopedia of Applied Physics*, volumen 11. Dirigido por George L. Trigg. VCH Publishers, 1994.

NANOPHASE MATERIALS: SYNTHESIS, PROPERTIES, APPLICATIONS. Dirigido por G. C. Hadjipanayis y R. W. Siegel. Kluwer Academic Publishers, 1994.

NANOSTRUCTURED MATERIALS: STATE OF THE ART AND PERSPECTIVES. H. Gleiter en *Proceedings of the Second International Conference on Nanostructured Materials*. Dirigido por H. E. Schaefer, R. Wüschum, H. Gleiter y T. Tsakalakos en *Nanostructured Materials*, vol. 6, números 1-4, páginas 3-14; 1995.

PERFILES

Marguerite Holloway

MANUEL ELKIN PATARROYO: El hombre que quiso vencer la malaria

Construido hace casi un siglo el edificio de piedra donde me recibe, presenta un aspecto destartalado con las baldosas removidas y las palomas dueñas de los aleros. Marcos mohosos, sin cristaleras, y malas hierbas que crecen por todas partes. Este edificio del centro de Bogotá preanuncia que la selva no queda muy lejos. "Así empiezan mis edificios", dice Manuel Elkin Patarroyo, orgulloso del esfuerzo con el que ha transformado otras construcciones de los aledaños en un rincón encantador, rodeado de jardines, a imagen del Instituto Pasteur de París, un parecido que le deleita porque —dice— eso irrita a sus competidores de allí. Esta ampliación del Instituto de Inmunología del Hospital San Juan de Dios le permitirá a Patarroyo reforzar su capacidad de investigación y comenzar la producción en masa de la fuente de su fama: la vacuna contra la malaria SPf66.

Patarroyo posee un talento para transformar otras cosas aparte de la arquitectura. En los diez años que siguieron a su entrada en el panorama internacional de la inmunología, ha pasado por innumerables altibajos. En este momento, atraviesa de nuevo un bajón, y por un motivo de peso. El último ensayo de la vacuna SPf66 (publicado en *Lancet* el pasado mes de septiembre) resultó un fracaso: los niños tailandeses a los que se les inyectaron varias dosis no quedaron mejor protegidos que los que recibieron un placebo. Este hallazgo se suma a un estudio de 1995 con niños de Gambia, en el que la vacuna se reveló igualmente ineficaz.

Pero Patarroyo ya ha salido de otras. Y en cualquier caso, para él no existen bajones, digan lo que digan los estudios. Su ánimo es indomable, como firme es su decisión a no responder a las críticas. "No me importan. No pueden conmigo. Es problema de ellos", dice resuelto. "Mi entusiasmo no me abandona ni por un instante. ¡Al contrario! No saben el favor que me hacen."

Camina raudo de un laboratorio a otro. Da una vuelta por la sala de modelos moleculares, que trabaja en la tuberculosis y la leishmaniasis. Nos detenemos en la "*peptidería*", donde se guardan los péptidos sintéticos con los que se elabora la vacuna. Señala asimismo otros muchos laboratorios y el acceso a la zona de entrada restringida donde se fabrica la vacuna SPf66. "Normalmente llego a las ocho de la mañana y acabo a las 10 de la noche, sábados incluidos. No me resulta raro, porque eso es lo que me gusta", afirma, parándose frente a un mural, una de las muchas obras donadas al instituto por famosos artistas hispanoamericanos.

Un grupo de colegas pasa en ese momento. Patarroyo despeina a uno, le da una palmada en la espalda a otro, les toma el pelo. Todos bromean con él. Explica —ahora el telón de fondo lo proporciona el colorido y abigarrado "Sentido de la Inmunología", del pintor colombiano Gustavo Zalamea— que monta competiciones para ver quién acaba antes su trabajo. Ha prometido viajes a Cartagena (una bella ciudad de la costa), o plazas en la cena de la ceremonia de entrega de los premios Nobel, para los investigadores que acaben sus proyectos antes del plazo. "Pero les digo: 'Sois unos ceporros, si queréis ir a los Nobel os tenéis que comprar un *smoking*, no sea que vayamos a parecer unos subdesarrollados'", cuenta entre risas.



Define su situación como la típica de un científico del Tercer Mundo. No puede dejar de admitir, sin embargo, que es un privilegiado. En Colombia se le considera héroe nacional; según la encuesta de una revista, su popularidad es superior a la del escritor Gabriel García Márquez. El gobierno le asegura su financiación, así como el acceso a un gran número de monos pertenecientes a una raza de las pocas que pueden servir de huéspedes al parásito de la malaria que infecta al hombre. A diferencia de la mayoría de los investigadores cuya financiación está ligada a sus resultados y a su capacidad de maniobra, él puede prescindir olímpicamente de sus críticos.

Lo que no puede permitirse, en cambio, es ignorar la realidad de la vida en Colombia, donde numerosos grupos guerrilleros luchan por el poder, donde los traficantes de droga se hallan en todas partes y donde el realismo mágico de García Márquez puede parecer prosaico. El

verano del año pasado, un cargamento del polvo blanco de Patarroyo —el SPf66— se reemplazó por una "harina" muy distinta. Y hace unos cuantos años, los guerrilleros le tendieron una emboscada a él y a su familia cuando regresaban de visitar unas ruinas precolombinas. "Me detuvieron durante cinco horas porque querían hablar conmigo", comenta, quitando interés a la experiencia, con una voz quizá más baja de lo que pretende.

Pero lo que le hace más feliz de su notoriedad, continúa rápidamente, es que los jóvenes colombianos se interesan cada vez más por la ciencia. Otra encuesta reciente afirmaba que el 67 % de los niños de esa nación quieren ser científicos. "¿Qué mejor éxito podría yo desear? Haber ofrecido a este país una consciencia", exclama. "Los chicos, en vez de querer ser Maradonas o cantantes de rock, ¡pues no!, prefieren ser científicos, y eso es muy importante para nuestro país."

El mismo tenía sus propias ilusiones de joven, según me cuenta: "A los once años, empezó a atraerme la química. Y mi sueño era siempre fabricar vacunas sintéticas." Sus padres eran negociantes y querían que sus hijos siguieran sus pasos. No parece que lo consiguieran. Entre sus vástagos hay cinco médicos, una enfermera y un psicólogo infantil. Pese a la contrariedad paterna, reconoce que le inculcaron un sentimiento firme de que cualquier cosa que hiciera sirviera para los demás.

A finales de los sesenta, partió al extranjero, algo que recomienda a sus investigadores. Tras un breve contacto con la virología en la Universidad de Yale en 1968, trabajó en inmunología durante varios años en la Universidad Rockefeller. Regresó a Colombia, donde estudió varias enfermedades infecciosas, hasta que un colega le urgió a cambiar de objetivo. "Me dijo que estaba perdiendo el tiempo, que estaba trabajando en un problema que no era tan grave como la malaria. Y me dio las estadísticas", recuerda, mientras conduce con soltura entre el tráfico de las calles de Bogotá. Cada año, contraen la malaria nada menos que 500 millones de personas; entre 1,5 y 3 millones de ellas, en su mayoría niños, mueren. El tratamiento de la enfermedad es complicado, porque en muchas regiones algunas cepas del parásito se han vuelto resistentes a la droga principal, la cloroquina, y cada vez parece más claro que la alternativa, Lariam, entraña excesiva toxicidad.

El enfoque que acometió para desarrollar una vacuna de malaria se salía de la ortodoxia. En vez de crearla a partir de cepas del parásito de la malaria, ya fueran muertas, ya debilitadas, sintetizó péptidos idénticos a los que usa la cepa más virulenta, *Plasmodium falciparum*. En la época en que realizaba los experimentos iniciales, pocos inmunólogos pensaban que los péptidos manufacturados podrían producir una enérgica respuesta inmune. Pese a todo, sometió a prueba la capacidad de varios péptidos para producir anticuerpos en los monos y seleccionó cuatro: uno usado por el parásito durante su estadio larvario, y tres usados por el parásito ya maduro para fijar e infectar los eritrocitos. En 1987 publicó que la vacuna protegía al 50 por ciento de los monos. La controversia estalló en cuanto

"Los científicos somos realmente unos privilegiados", dice Patarroyo.

los investigadores intentaron reproducir en vano los resultados. A ello replica que usaron un compuesto diferente.

Mientras almorzamos en un restaurante típico, aprovecha un intervalo para trazar un eje en un papel, que representa el tiempo, en el que marca las fechas de sus artículos. Tras su primer éxito llegó el primer traspiés. "Cometí un error a causa de mi ignorancia en epidemiología", explica. Decidió aplicar la vacuna a sujetos humanos sin poner en práctica un estudio de doble ciego. La comunidad científica le reprochó su metodología y la falta de ética por haber pasado tan rápido a las pruebas con personas.

Conforme aparecieron, a lo largo de los años, otros resultados —la vacuna, aunque segura, ofrecía una protección irregular y variable—, la opinión de los expertos continuaba dividida. "Siempre ha sido una personalidad muy fuerte, que despierta emociones contrapuestas", señala Hans Wigzell, director del Instituto Karolinska de Estocolmo. "Me ha impresionado mucho su empuje. Su ciencia es fuerza bruta."

En la mayoría de los estudios, la vacuna sólo aprovechaba a entre un 30 y un 40 por ciento de los pacientes. Pero esa cifra podía leerse de distintas maneras. El 30 por ciento de 500 millones es una cifra considerable. Se juzgaba con diferente calibre el SPf66 y el resto de las vacunas a causa de las peculiaridades de la malaria: incluso la gente que ha desarrollado una inmunidad natural contra el parásito la pierde a veces. Conforme los ensayos a gran escala en Colombia y en Tanzania confirmaban ese 30 por ciento, parecía que Patarroyo ganara la partida. En 1995 cedió los derechos de la vacuna a la Organización Mundial de la Salud.

Se produjeron entonces los episodios de Gambia y Tailandia. Aunque algunos inmunólogos mantienen que no están dispuestos a darse por vencidos con el SPf66, no ocultan su frustración por la variabilidad de los resultados. "Tiene que haber algún método de evaluar por qué funciona o deja de funcionar", comenta Louis Miller, del Instituto Nacional de la Salud de los Estados Unidos.

Patarroyo enumera a bote pronto varias razones. Los sistemas inmunitarios de los niños pequeños, como esos de entre seis y once meses a los que se inoculó en Gambia, difieren de los que presentan ya desarrollados los adultos. Además, la vacuna usada en Tailandia quizá no fuera idéntica al SPf66. Por no hablar de la variabilidad genética de los individuos y su influencia en la determinación de las respuestas inmunitarias. Pero no le interesa entrar en discusiones bizantinas. Simplemente quiere seguir adelante, estudiar cómo mejorar la vacuna y desarrollar otras. Ese es el lema del instituto, insiste: "La búsqueda de la esencia de las cosas. No si desarrollamos una vacuna contra la malaria. Lo que queremos es desarrollar una metodología. Realmente fabricar vacunas." Y Patarroyo deja entrever en ese momento que sus nuevas investigaciones pueden revelar por qué el SPf66 se muestra tan caprichoso.

Sea lo que fuera lo que guarda en la recámara, el SPf66 sigue siendo la única vacuna contra la malaria en etapa de ensayo, y su trabajo, desconcertante y controvertido, ha animado la especialidad. Por lo que a él respecta, se le ve encantando en su bata de investigador, encantado de dirigir su laboratorio y encantado de ser libre de pensar y transformar. "¡El desarrollo intelectual! ¿Cuántos consiguen eso? La mayoría de la gente tiene que hacer cosas que no les gusta."

Infecciones graves

Peritonitis bacteriana espontánea

Las infecciones bacterianas constituyen una complicación frecuente en pacientes afectos de cirrosis hepática. En los enfermos cirróticos se han observado múltiples trastornos de la inmunidad celular y humoral que explicarían esta predisposición a las infecciones. Destaca en particular una menor actividad de la capacidad fagocitaria del sistema retículo endotelial, sobre todo en el sinusoide hepático, niveles bajos de complemento sérico o trastornos en la función de los leucocitos polimorfonucleares.

La peritonitis bacteriana espontánea (PBE) es la infección más característica. Así se llama la infección del líquido ascítico acumulado en la cavidad peritoneal que aparece sin que exista un proceso intraabdominal asociado (perforación de una víscera hueca o un absceso intraabdominal).

Se estima que la incidencia de PBE en los pacientes cirróticos que ingresan en un hospital oscila entre el 7 y el 23 %. La mayoría de los gérmenes responsables de la PBE son bacilos gram-negativos, componentes habituales de la flora intestinal normal. Estos gérmenes pasan a la sangre saltándose los mecanismos de defensa de la barrera intestinal y colonizan los líquidos corporales. El desarrollo final de una PBE depende de factores defensivos locales del líquido ascítico que están relacionados con la concentración de proteínas del mismo.

El cuadro clínico de la peritonitis bacteriana espontánea es muy variable. Va desde la peritonitis con fiebre, escalofríos, dolor abdominal difuso y disminución de los ruidos intestinales hasta las PBE totalmente asintomáticas. Su diagnóstico requiere de un alto índice de sospecha, que sólo el examen del líquido ascítico es capaz de confirmar. Por eso, resulta obligado realizar un análisis o paracentesis exploradora a cualquier paciente cirrótico con algún síntoma compatible; medidas que también deben tomarse cuando se aprecie un empeoramiento progresivo del estado clínico sin causa aparente.

El principal dato que nos suministra el laboratorio es el incremento del recuento de leucocitos en el líquido ascítico, a expensas de un aumento en el número de polimorfonucleares. Se considera que el recuento mínimo de leucocitos polimorfonucleares que distingue a una ascitis no complicada de una PBE, y que permite establecer el diagnóstico e iniciar el tratamiento antibiótico, es de 250 polimorfonucleares por mililitro.

El pronóstico de la PBE ha mejorado notablemente en los últimos 15 años. Gracias a un mejor reconocimiento de los síntomas y signos asociados, podemos emitir un diagnóstico en fases de la infección más tempranas. Ese progreso ha venido instado por la práctica rutinaria de paracentesis diagnósticas en todo paciente cirrótico que ingresa en el hospital con ascitis y, especialmente, por la utilización de tratamientos antibióticos más eficaces y con un margen de seguridad más amplio.

Antes de 1980 las tasas de curación de la infección y de supervivencia al final de la hospitalización oscilaban entre 25-50 % y 0-20 %, respectivamente. En las series más recientes se recogen tasas superiores al 75 y 60 %, respectivamente. No debe olvidarse, sin embargo, que la cifra de mortandad se encuentra todavía en un 20-30 % de los pacientes, pese a haber curado la infección. El desarrollo de insuficiencia renal tras el diagnóstico de la infección, la existencia de una enfermedad hepática avanzada y de complicaciones relacionadas con la peritonitis son factores predictivos de mortalidad en estos pacientes que han respondido al tratamiento.



Vías propuestas para justificar el paso de bacterias a la circulación sanguínea y posterior colonización de la ascitis

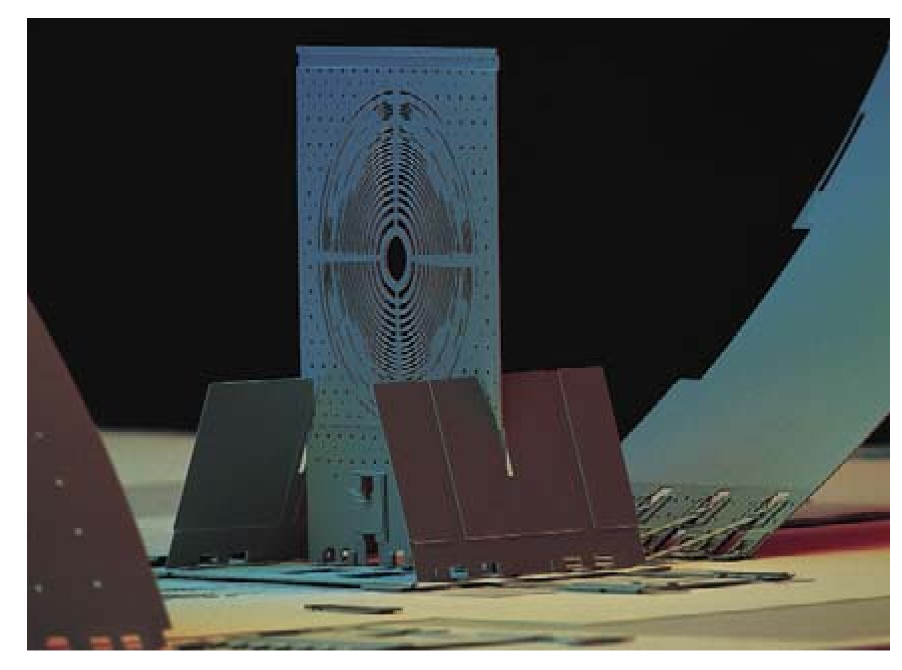
Considerada la gravedad que encierra la PBE, debe iniciarse el tratamiento antibiótico en cuanto se ha realizado el diagnóstico clínico y biológico de la infección, sin esperar la confirmación microbiológica que sólo se obtiene en el 60 % de los casos. Por ser muy extensa la diversidad de gérmenes que pueden causar una PBE, conviene administrar un antibiótico que cubra un amplio espectro de gérmenes gram-positivos y gram-negativos. En este sentido las cefalosporinas de tercera generación y, en especial, la cefotaxima parecen los más indicados. Algunos sugieren que los episodios de PBE no complicadas con insuficiencia renal, íleo o hemorragia digestiva podrían tratarse con ofloxacino oral.

La infección es recidivante. Aproximadamente el 70 % de los pacientes que superan el episodio volverán a presentar una nueva PBE en el transcurso del siguiente año. Ese

es el motivo por el que se les somete a una decontaminación intestinal selectiva con antibióticos orales que son activos frente a bacterias gramnegativas sin dañar el resto de la flora intestinal.

Los pacientes cirróticos que han presentado una PBE tienen un pronóstico de supervivencia muy pobre a medio plazo (inferior al 30 % a los tres años). Si tenemos en cuenta que el trasplante hepático en estos enfermos ofrece una supervivencia superior al 70 % a los tres años, será forzoso reconocer que el antecedente de una PBE constituye una indicación clara de trasplante hepático.

MIQUEL NAVASA ANADÓN
E ISABEL CIRERA LORENZO
Unidad de Hepatología.
Hospital Clínico y Provincial
de Barcelona



1. Lente microscópica. Tiene un diámetro de 128 micrometros y descansa sobre una micropastilla de silicio

Micromecánica

Trabajo de integración

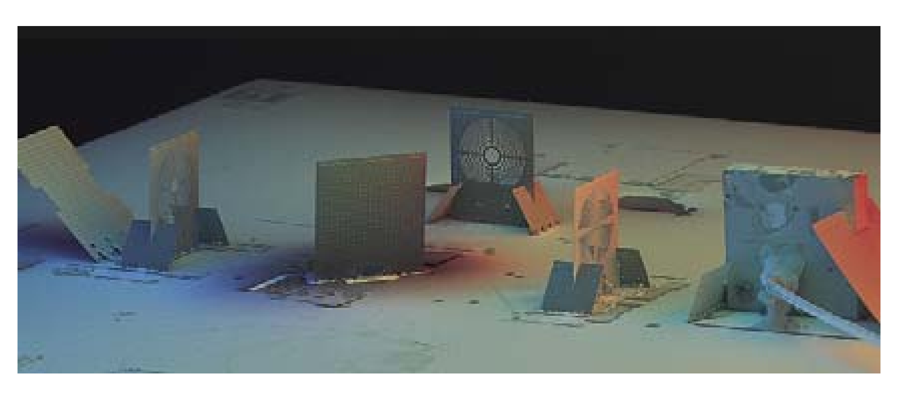
Las imágenes de motores no mayores que el diámetro de un cabello constituyeron la noticia privilegiada de la sección de ciencia de los periódicos a finales de los años ochenta. Pero, ¿qué se puede hacer exactamente con un rotor de 70 micrometros de ancho? Los elementos rotatorios de esas miniaturas de motor producen un par de sólo algunas billonésimas de newtons-metro, suficiente para enviar a un flagelado a su destino, pero no mucho más.

Diez años después, lejos de titulares espectaculares de los noticiarios, un equipo de investigadores han hallado aplicaciones casi obligadas para esos motores diminutos y otros mecanismos microscópicos. Tales ingenios podrían resultar ideales para manipular algo tan ligero como la luz. Las micromáquinas pueden mover espejos, lentes y otros elementos, de suerte que los fotones se reflejen, transmitan o difracten. Nos referimos a los sistemas microoptomecánicos.

La compañía de semiconductores Texas Instruments ha puesto toda la carne en el asador en el futuro de este acoplamiento natural de la óptica con la electrónica. Ha abierto ya mercado para una pantalla electrónica cuyos elementos de imagen, o píxeles, están controlados por estructuras micromecánicas. La pantalla contiene medio millón de espejos de aluminio, cada uno de 16 micrometros de lado. Los espejos se inclinan hacia su posición "activa" o "inactiva" en respuesta a un impulso eléctrico. Cuando la pantalla se activa, los destellos de luz coloreada se reflejan en otra pantalla mayor.

Pero Texas Instruments ya no está sola. Los centros públicos de investigación han comenzado a explorar las posibilidades técnicas de la micromecánica para procesar la luz. A este respecto, el grupo que Mehran Mehregany encabeza en la Universidad de Case Western Reserve ha instalado un dispositivo explorador en una pastilla, construyendo así una versión miniaturizada de la clase de sistemas de vigilancia de un supermercado que lee un código de barras mediante un haz de luz. Construyeron el dispositivo explorador grabando una red de difracción en el interior de los micromotores en rotación. Para operar, hay que provocar que un diodo láser infrarrojo focalice su luz sobre la red (una serie de ranuras paralelas en la superficie del rotor). La red difracta el haz sobre un código de barras; entonces, el rotor, en movimiento, dispersa el haz por las líneas. La luz reflejada por el código de barras incide sobre un fotodetector, que traduce la señal en un impulso eléctrico para su procesado por la circuitería de cálculo.

Debería poderse obtenerse unos microexploradores mínimos y baratos. El elemento explorador giratorio, que mide 500 micrometros de diámetro, aunque mayor que los primitivos micromotores, es suficientemente pequeño para que operen a la vez muchas ruedas giratorias. Tal conjunto podría leer códigos de barras



2. Cabeza sensora de un disco óptico realizada en la Universidad de California en Los Angeles

complicados que presenten algo más que el nombre y precio del producto. En otro ámbito, las empresas de telecomunicación podrían servirse de un explorador para difractar la luz de una señal incidente, logrando que la información procedente de una fibra óptica se encaminara hacia otras fibras.

El grupo de Mehregany ha desarrollado también un proceso para crear superficies especulares sobre el silicio. Dirigido sobre un haz reflejado en la superficie de una micropastilla, el espejo de silicio está capacitado para modificar la longitud de onda de un láser o servir de filtro en convertidores de señales ópticas en impulsos electrónicos.

La Universidad de California en Los Angeles (UCLA) no quiere rezagarse. Ha comenzado a integrar dispositivos ópticos muy diversos en una micropastilla de silicio. El grupo, encabezado por Ming Wu, ha construido un banco óptico, esto es, una versión miniaturizada del conjunto de lentes, láseres y filtros usados en los departamentos de física de las universidades. La alineación y la colocación de los componentes ópticos, labores complicadas, suelen reservarse a técnicos de laboratorio. En un banco óptico de tamaño normal, los componentes se sujetan a complicadas monturas sobre mesas estabilizadas. En el montaje de Wu, todos los elementos ópticos, excepto los láseres, pueden integrarse en una micropastilla sin más que echar mano de las técnicas conocidas de litografiado y grabado al agua fuerte. Se ahorra así la trabajosa labor de montar a mano los componentes optoelectrónicos.

Los investigadores de la UCLA han fabricado una lente unida a una bisagra microscópica, ideada por Kristofer S. J. Pister. La bisagra permite que la lente gire hasta colocarse en ángulo recto con la superficie de silicio de la pastilla. Una vez que la lente se aparta de la superficie plana del silicio, un haz paralelo a la superficie de la micropastilla puede atravesarla. Aunque la lente requiere todavía algún ajuste manual —paso que los investigadores están tratando de eliminar— la alineación final del dispositivo puede realizarse mediante motores micromecánicos, diminutas placas que giran o se mueven hacia delante y hacia atrás debajo de la lente.

El método podría aplicarse a la construcción de sensores mecánicos que se mueven sobre discos ópticos para descodificar los datos. Gracias a su extraordinaria ligereza, la cabeza micromecánica se movería rauda sobre la superficie del disco, acelerando el ritmo de lectura de la información. Wu ha empleado las mismas técnicas para fabricar un conmutador mecánico que puede dirigir una señal óptica, de modo que se salte un ordenador averiado. Otros investigadores se centran en los sistemas microoptomecánicos para óptica adaptativa, que ajusta la luz que penetra en un telescopio para compensar las distorsiones introducidas por la presencia de la turbulencia atmosférica. La búsqueda sigue.

GARY STIX

Atmósfera de Júpiter

¿Por dónde entró la sonda Galileo?

Tras la maniobra de liberación de la sonda *Galileo*, que tuvo lugar el 13 de julio de 1995, el resto de la nave (orbital Galileo) continuó su trayectoria separado de la cápsula. Poco después encendió motores para salirse de la trayectoria de colisión.

El éxito de tan delicada maniobra hizo recobrar la esperanza de que el proyecto habría de proporcionar una de las piezas básicas en la exploración del sistema solar, pese a que la antena principal del orbital se había estropeado. La esperanza se hizo realidad el 7 de diciembre de 1995, con la entrada de la sonda en la atmósfera de Júpiter. Por primera vez en la historia de la exploración espacial, se obtuvieron mediciones *in situ* de un planeta gigante gaseoso.

Las coordenadas de entrada de la sonda en Júpiter se conocían con bastante exactitud desde que se diseñó la misión espacial. Estas coordenadas eran 6,54 grados de latitud jovicéntrica y 4,46 grados de longitud en el llamado sistema III de referencia. Pero no bastaba con saber las coordenadas para resolver el problema de la región exacta por donde entraría la sonda. Júpiter tiene una atmósfera espesísima, con una compleja dinámica, en la cual se generan y desintegran continuamente formaciones nubosas muy dispares.

Nos hallábamos en la situación de una civilización extraterrestre que enviase una sonda a nuestro planeta para explorarlo y necesitase conocer

(para interpretar los datos atmosféricos) si la sonda entraría en el ojo de un huracán, en medio de una borrasca o en una región limpia de nubes. También nosotros, para interpretar los datos proporcionados por la sonda *Galileo*, debíamos determinar en qué región de Júpiter entró la sonda *Galileo*.

El problema no habría resultado desmesuradamente complicado si el orbital Galileo hubiera tomado imágenes y espectros de la región de entrada, cuando penetraba el 7 de diciembre. Sin embargo, un fallo mecánico de la cinta de grabación de datos que el orbital lleva a bordo, le impidió ejecutar esa tarea.

Pasó entonces la responsabilidad a las observaciones desde tierra, dispuestas para la misión de apoyo del proyecto (con medidas en diferentes regiones espectrales). Aun así, el problema de la determinación de la zona de entrada seguía siendo grave. El 7 de diciembre de 1995 (fecha de la entrada) Júpiter se encontraba a sólo 12 grados del Sol, visto desde la Tierra. Eso significaba que había que observar durante la jornada un objeto menos brillante que el propio cielo, con la dificultad añadida de que, apuntando tan cerca (en ángulo) del Sol, la posibilidad de recoger accidentalmente luz solar en los telescopios era altísima. Por culpa de la luminosidad solar y la enorme capacidad colectora de los telescopios, el trabajo a acometer podría poner en peligro la integridad de los instrumentos y la de los propios operarios, expuestos a quemaduras.

La dificultad se superó con el telescopio infrarrojo IRTF del observatorio hawaiano de Mauna Kea, que se sirve de una capa de un plástico especial opaca a la luz del visible, pero transparente a la del rango del infrarrojo medio y lejano.

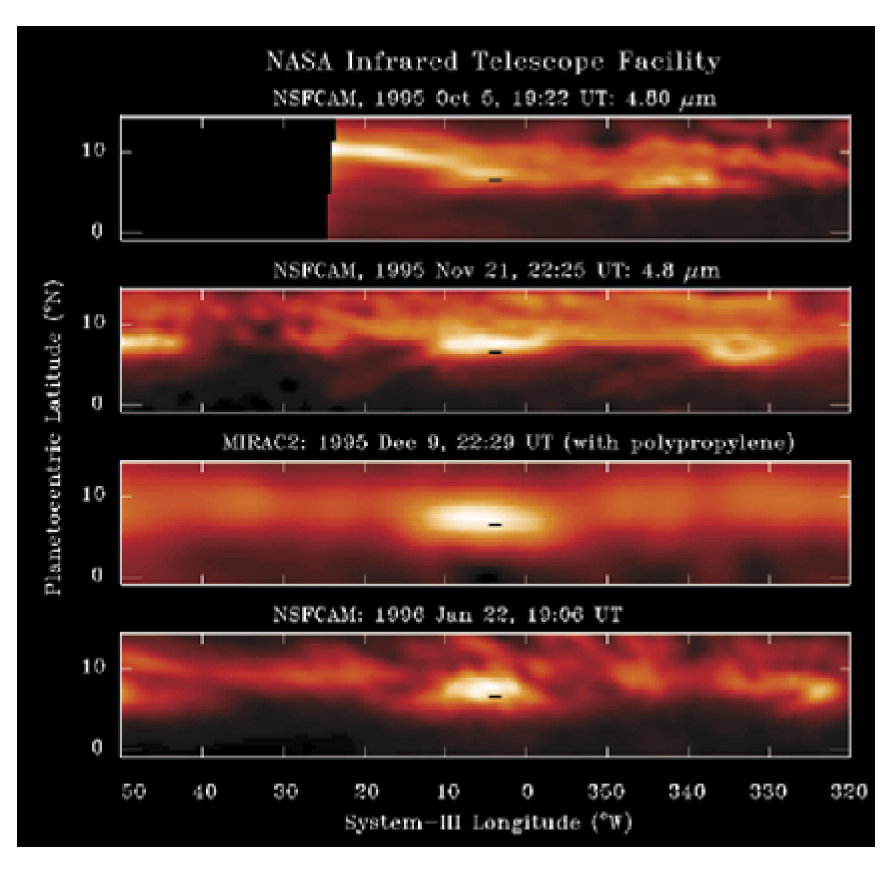
Para observar Júpiter en la región espectral del visible con un riesgo mínimo, había que recurrir a telescopios solares, diseñados para observar el astro sin peligro. Así se acondicionaron ciertos telescopios solares, que se enfocaron ahora hacia Júpiter. Pese a todo, lo mismo en el infrarrojo que en el visible, las imágenes espectrales sufrían intensas degradaciones por culpa del ruido de fondo del cielo y de las fuertes distorsiones en el frente de onda causadas por la atmósfera terrestre.

Dos factores ayudaron a superar el inconveniente. En primer lugar, se había procedido a la observación regular de Júpiter antes y después de la sonda. Tarea en la que tuvo parte destacada el telescopio IRTF de Mauna Kea, así como otros telescopios de menor apertura que operaban en el visible. En segundo lugar, se contaba con técnicas numéricas para mejorar la resolución espacial de las imágenes cuando éstas resultan degradadas por un esparcimiento anómalo y por el ruido. Esas técnicas se venían aplicando a la corrección de defectos de óptica, como el sufrido por el telescopio Hubble en su primera fase. Pero sirven también en otros fenómenos de esparcimiento, como el que ocurre cuando nuestra turbulenta atmósfera intercepta la luz de los astros.

Gracias a esas técnicas y otros métodos ingeniosos se consiguió mejorar la resolución espacial de las imágenes hasta el punto de poder identificar sin ambigüedad la región de entrada de la sonda.

La sonda penetró en la atmósfera de Júpiter por una “mancha caliente”. No exactamente en la zona donde la temperatura de brillo es máxima, sino hacia el borde sur de esta formación. Este tipo de formaciones tienen una temperatura de brillo central de unos 255 grados K en la banda espectral de 5 micrometros, banda en la que la absorción debida a los gases de la atmósfera de Júpiter y a sus nubes es mínima. Sin embargo, la cantidad de luz solar reflejada por dichas zonas en la parte roja del espectro es bastante menor que las de la mayoría de las regiones que observamos en el planeta (entre un 30 y un 40 por ciento más baja). Este fenómeno volvemos a encontrarlo con las partes del espectro infrarrojo, que muestran radiación reflejada de Júpiter fuera de sus bandas de absorción molecular.

La velocidad zonal media de los vientos en el centro de la mancha caliente donde entró la sonda es 102,8 metros por segundo con respecto al sistema de referencia III de Júpiter, sistema que representa la rotación del supuesto núcleo joviano. Si bien esta es la velocidad del centro de la mancha caliente, los alrededores del centro pueden tener velocidades locales diferentes, pues están afectados por las condiciones dinámicas



Mapas cilíndricos de la radiancia en la banda infrarroja de 5 micrometros de Júpiter, centrados en la latitud de entrada de la sonda Galileo (marcada con un trazo oscuro en los mapas). *Estos mapas muestran la evolución morfológica, en un intervalo de varios meses, de la estructura atmosférica donde penetró la sonda. La longitud corresponde a la fecha del 7 de diciembre*



La generación de rostros

Según Alice J. O'Toole, de la Universidad de Texas en Dallas, y Thomas Vetter, del Instituto Max Plank de Cibernética Biológica, en Tubinga, una sola variable abarca en muy buena medida la diferencia entre un rostro de hombre y un rostro de mujer. Analizaron las cabezas de 65 hombres y 65 mujeres, y obtuvieron una cabeza promedio (*abajo, en el centro*) y una serie de correcciones de la misma, las "cabezas características". Cuando se sumaba la primera cabeza característica a la cabeza promedio salía una cabeza de hombre (*arriba, a la izquierda*); cuando se restaba, quedaba una cabeza de mujer (*abajo, a la derecha*). Una cabeza característica diferente codificaba sutiles variaciones (*abajo, a la izquierda, y arriba a la derecha*).

—Madhusree Mukerjee

de las regiones adyacentes. Aunque la mancha caliente ha mantenido su nivel térmico durante varios meses, su morfología ha cambiado en el transcurso de ese intervalo. El área total de Júpiter cubierto por esta y otras manchas calientes no llega al uno por ciento.

Inferimos, a partir de las propiedades de las manchas calientes, que el lugar por donde entró la sonda *Galileo* se halla bastante libre de nubes o, al menos, de partículas de radio superior a 1 micra. Lo avala además el hecho de que podamos observar bien los cromóforos de los niveles más profundos. La pequeña cantidad de partículas detectada por el nefelómetro de la sonda corrobora nuestra interpretación.

La razón de que estas manchas calientes se hallen relativamente exentas de nubes implica que contienen poca cantidad de especies condensables, pues se trata de masas de aire que desciende tras haberse enfriado y secado previamente por condensación en regiones adyacentes (las regiones adyacentes muestran una profusa estructura de nubes). La baja humedad de la región de entrada de la sonda, medida por el Espectrómetro de Masa Neutra y el Radiómetro de Flujo Neto, instrumentos instalados a bordo de la sonda, respaldan esa interpretación. Como asimismo la confirman los movimientos descendentes de aire medidos por el acelerómetro del Instrumento de la Estructura Atmosférica.

En resumen, podemos afirmar que la sonda *Galileo* entró en una región nada representativa de lo que deben ser las condiciones atmosféricas promedio de Júpiter. Para recabar información sobre regiones más características del planeta habrá que aguardar las observaciones que realicen los diversos instrumentos que van a bordo del orbital Galileo, en su periplo de dos años alrededor del planeta gigante.

J. L. Ortiz, T. Martín, G. Orton
Laboratorio de Propulsión a Chorro
Instituto de Tecnología de California
Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC, Granada

Mensajes con doble sentido

Regulación de la maduración de los ARN mensajeros

Todas las células de un organismo contienen el mismo material genético. Cada tipo de célula, sin embargo, posee una identidad y una función exclusivas. Para establecer su identidad, las células siguen la estrategia de expresar solamente una fracción de los genes que contienen. Cada gen es responsable de la síntesis de una proteína; por tanto, la expresión diferencial de los genes confiere a cada tipo celular un conjunto de proteínas característico que definen su función específica dentro del organismo: sintetizar insulina, transmitir impulsos nerviosos, producir anticuerpos, etcétera.

La expresión de los genes se lleva a cabo en dos fases. En la primera, la molécula de ácido desoxirribonucleico (ADN) que constituye cada gen sirve de molde para la síntesis de una copia

en forma de ácido ribonucleico (ARN). En la segunda fase, la información contenida en la secuencia de unidades químicas (nucleótidos) del ARN se traduce en la secuencia de unidades químicas (aminoácidos) característica de cada proteína. Así pues, este tipo de ARN actúa como transmisor de información entre el gen y la proteína, de ahí que se le denomine ARN mensajero (ARNm).

Un sorprendente descubrimiento realizado a finales de los setenta por Phillip A. Sharp, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Richard J. Roberts, por aquel entonces en los laboratorios de Cold Spring Harbor, abrió todo un nuevo campo en el estudio de la expresión génica. Los equipos dirigidos por estos investigadores encontraron que muchos ARNm, recién sintetizados a partir del ADN, no pueden utilizarse directamente para la síntesis de proteínas, sino que necesitan un proceso de maduración que convierta el ARN acabado de sintetizar (pre-ARNm) en ARNm maduro. Maduración que es imprescindible para eliminar regiones del pre-ARNm que no contienen información relativa a la síntesis de la proteína. A esas regiones que no intervienen en la síntesis proteica se las denomina intrones; paradójicamente, suelen ser mucho mayores que las regiones que dirigen la síntesis de la proteína, los exones.

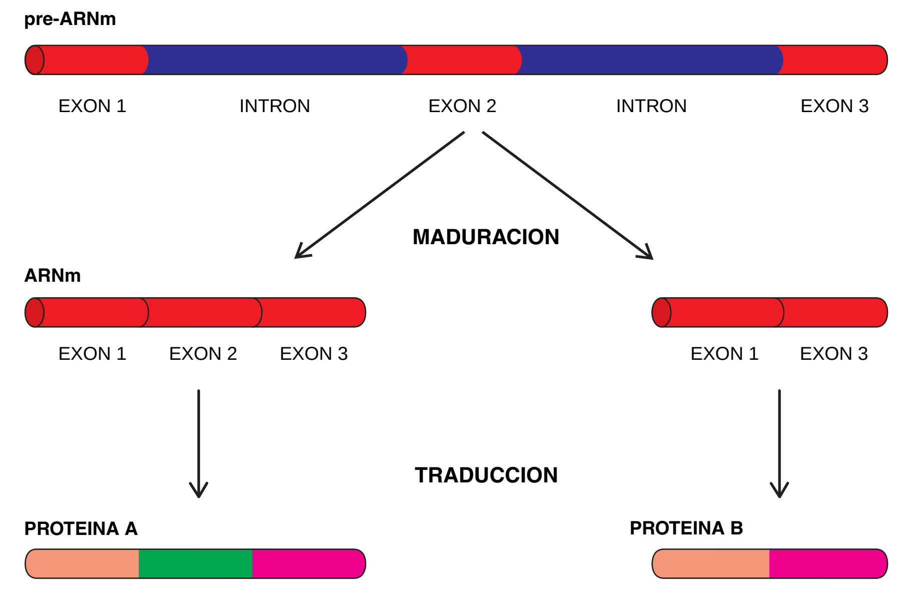
¿Qué función puede tener la presencia de secuencias carentes de sentido intercaladas en un mensaje? Aunque el origen de los intrones es todavía objeto de debate, lo cierto es que las células parecen haber aprovechado su existencia para ampliar sus posibilidades de regulación génica.

Muchos pre-ARNm pueden procesarse de forma diversa y, así, se generan ARNm maduros capaces de producir diferentes proteínas a partir de un mismo gen. La ilustración muestra un ejemplo de este tipo de mecanismo: un hipotético pre-ARNm con tres exones puede madurar de suerte tal que el ARNm resultante contenga los tres exones, o bien hacerlo de modo que ignore la presencia del exón intermedio y engarce directamente los exones 1 y 3. Cuando estos diferentes ARNm se traduzcan en proteínas, los polipéptidos en cuestión poseerán diferentes estructuras y propiedades. De esa forma, la maduración alternativa de los pre-ARNm aumenta la capacidad de los genes para producir distintas proteínas.

El aspecto más interesante de esta versatilidad reside en la regulación, muy frecuente, de la utilización de una vía de maduración u otra. Gracias a ese control, cada forma alternativa de ARNm (y, por tanto, cada forma alternativa de proteína) se produce en un tipo distinto de célula o en distintos estados fisiológicos de la misma célula. Se generan así proteínas con diferentes actividades en distintos tejidos o en distintos estadios del desarrollo del organismo. Mediante este tipo de mecanismo una célula puede, por ejemplo, regular su respuesta ante factores que estimulan el crecimiento, iniciar o reprimir procesos de suicidio celular, convertir un tumor benigno en maligno o producir muchos otros cambios en su fisiología.

Se conoce muy poco sobre los mecanismos moleculares que regulan la maduración alternativa de los pre-ARNm. Uno de los casos mejor estudiados lo tenemos en la determinación sexual de la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster*. Las hembras expresan una proteína, llamada *Sex-lethal*, que regula la maduración de múltiples pre-ARNm, induciendo así la síntesis de ciertas proteínas que se encargan de la formación de los caracteres sexuales y de las células germinales propias de las hembras. De esta forma, un solo factor regulador controla la expresión de múltiples genes en la etapa del procesamiento alternativo de sus pre-ARNm.

Aunque el procesamiento alternativo de los pre-ARNm es un fenómeno muy común en células de mamíferos, no se han encontrado todavía reguladores como *Sex-lethal* en tales organismos. Es probable que en los próximos años salgan a la luz factores reguladores de la maduración de los pre-ARNm que también controlen múltiples aspectos de la diferenciación celular y el desarrollo de los mamíferos, incluido el hombre. Estos estudios tienen el valor añadido de estar relacionados con procesos patológicos de gran incidencia en nuestra sociedad, como el cáncer, la inflamación y distintas enfermedades del sistema nervioso.



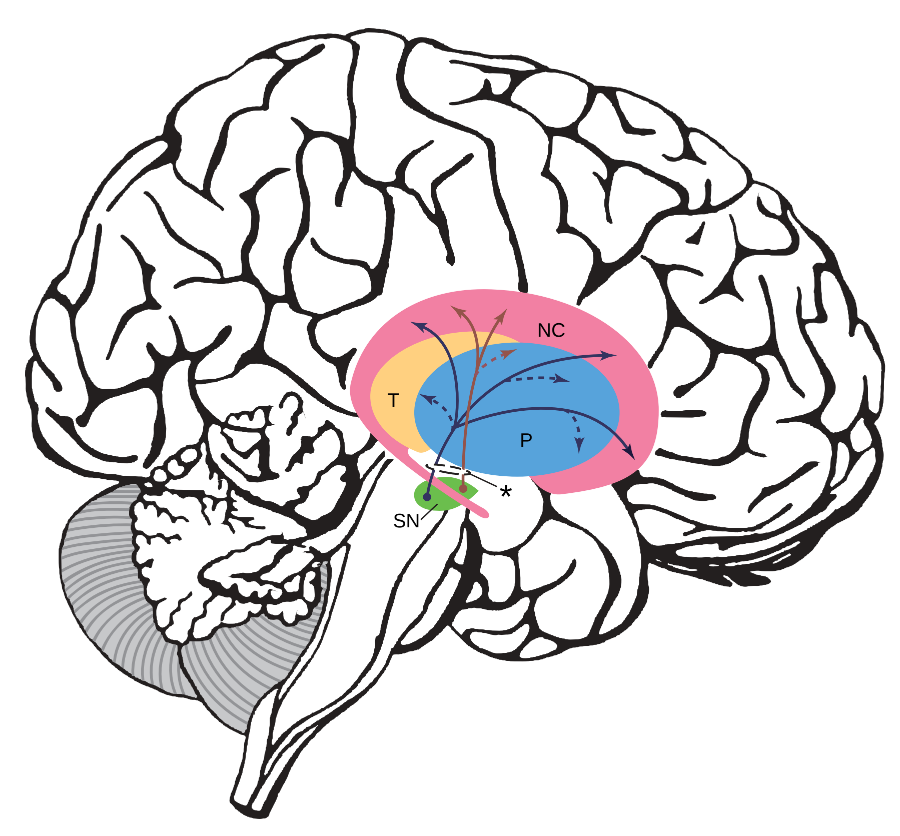
La maduración de los pre-ARNm puede ocurrir a través de rutas alternativas que dan lugar a distintos ARNm y, por tanto, a diferentes proteínas a partir de un mismo gen

JUAN VALCÁRCEL
Laboratorio Europeo de Biología Molecular (EMBL)
Heidelberg

Enfermedad de Parkinson

Nuevos hallazgos sobre las conexiones nerviosas nigroestriadas

En 1817 James Parkinson, médico londinense, describía de forma magistral una enfermedad que se presentaba en los pacientes con “un movimiento tembloroso, disminución de la potencia muscular (...), tendencia a encorvar el tronco y a pasar del andar al correr, permaneciendo



La vía nigroestriada, que comunica la sustancia negra con el complejo nuclear estriado, está formada por al menos dos poblaciones neuronales. Una de ellas inerva amplias extensiones del estriado, en tanto que la otra se ciñe a zonas más restringidas de esta estructura nerviosa

inalterados los sentidos y el intelecto”. La enfermedad de Parkinson, también llamada parálisis agitante, fue la primera alteración descrita en el hombre que implicaba unas estructuras del sistema nervioso denominadas ganglios basales.

En España, unas 50.000 personas sufren esta enfermedad, con una incidencia anual de una decena larga de casos por 100.000 habitantes. Afecta por igual a todas las razas y a ambos sexos. Puede aparecer en cualquier edad, pero es rara antes de los 40 años. Los pacientes presentan alteraciones motoras que característicamente se describen con la sintomatología clínica de acinesia (falta de habilidad o iniciativa y lentitud al efectuar movimientos), rigidez, temblor de reposo y alteración de los reflejos posturales.

Los pacientes parkinsonianos presentan una pérdida de neuronas en la sustancia negra, un núcleo del tronco del encéfalo que está íntimamente asociado a los ganglios basales. Las células de este núcleo, al igual que las del *locus coeruleus*, otro núcleo del tronco del encéfalo, muestran en estado normal un pigmento llamado neuromelanina. Se ha demostrado que en los pacientes con Parkinson se produce una despigmentación importante de los dos núcleos mencionados.

También parece claro que la pérdida de células nerviosas en la sustancia negra guarda relación directa con la disminución del neurotransmisor dopamina en el complejo nuclear estriado, que se halla extensamente conectado con la sustancia negra. Por ello, las conexiones nerviosas que unen la sustancia negra con el estriado —proyecciones nigroestriadas— estarían implicadas en la fisiopatología de la enfermedad de Parkinson. De hecho, la vía nerviosa nigroestriada, cuyas neuronas utilizan como neurotransmisor la dopamina, es la que está más afectada en la enfermedad de Parkinson.

Se ignora si todas las células de la sustancia negra que proyectan al estriado y utilizan dopamina como neurotransmisor tienen la misma importancia funcional en la aparición de la enfermedad. Se sabe que, mientras no desaparece un alto porcentaje de estas células (algunos trabajos hablan de hasta un 80 %), no empieza a manifestarse la sintomatología clínica del Parkinson.

Ante esa situación, nuestro grupo del Departamento de Morfología de la Universidad Autónoma de Madrid se propuso investigar las proyecciones nigroestriadas en animales de experimentación para determinar si podían acotarse diferentes poblaciones neuronales en la sustancia negra según sus conexiones con el estriado.

Mediante un estudio con trazadores neuronales hemos podido demostrar que existen, al menos, dos poblaciones neuronales diferentes en la sustancia negra que proyectan hacia el estriado. Una de ellas tiene una proyección nerviosa restringida hacia puntos definidos de esta estructura, mientras que la otra población neuronal de la sustancia negra proyecta hacia territorios más extensos del estriado. Este último grupo de neuronas nigroestriadas se alojan en lugares muy concretos de la sustancia negra (zona densocelular) y de otras estructuras funcionalmente ligadas a ella (área retrorrubral).

Nuestros resultados permiten establecer la hipótesis según la cual en las zonas troncoencefálicas que conectan con el estriado existen, al menos, dos tipos neuronales distintos cuya destrucción podría provocar alteraciones muy diferentes. Las neuronas de proyección más restringida son susceptibles de modificar el tono dopaminérgico en puntos definidos del estriado, mientras que las que proyectan extensamente sobre este núcleo de los ganglios basales podrían ejercer su acción sobre grandes territorios estriatales, y así, su muerte o alteración provocaría una caída brusca de dopamina en amplios territorios del estriado que, consecuentemente, podría desencadenar la variada sintomatología parkinsoniana.

Estos estudios morfológicos deben completarse con un estudio molecular de la población de neuronas nigroestriadas de más amplia proyección, para conocer la posible existencia de diferencias significativas con respecto a la población neuronal de proyección estriatal más restringida. Ello también podría tener implicaciones terapéuticas, como por ejemplo, el estudio de la respuesta de estas poblaciones neuronales a diferentes factores neurotróficos.

BERNARDO HONTANILLA,
SILVANO DE LAS HERAS
Y JOSÉ MANUEL GIMÉNEZ-AMAYA
Departamento de Morfología
de la Facultad de Medicina
de la Universidad Autónoma
de Madrid

Mejora vegetal

Las posibilidades de la yuca transgénica

Apenas conocida en el hemisferio Norte, la yuca o mandioca es un arbusto de raíces tuberosas y ricas en almidón que se cultiva en todas las zonas tropicales del mundo. Se estima que alrededor de 500 millones de personas hallan en ella su principal fuente de calorías.

La yuca es originaria de América del Sur. Se viene utilizando para consumo humano desde hace por lo menos 4000 años. Hoy se cultiva en más de 90 países de Sudamérica, Africa, y Asia. A pesar de que la planta no demanda especiales condiciones agronómicas, existen varios problemas que exigen solución si queremos sacarle mayor rendimiento a los cultivos. Aspectos importantes a considerar son, por ejemplo, la falta de resistencia a ciertas enfermedades de origen vírico o bacteriano, el bajo contenido proteico de las raíces y el deterioro rápido de éstas después de la cosecha (a los 3 o 4 días).

Con el advenimiento de la biotecnología en los años ochenta se vio que ésta podría brindar nuevas herramientas para la mejora de la yuca. Así, en 1988, se estableció la Red de Biotecnología de la Yuca, o CBN (por "Cassava Biotechnology Network") con el fin de coordinar las investigaciones. La CBN llegó a la conclusión de que el factor limitante para la aplicación de la biotecnología en la mejora de la yuca residía en la falta de un sistema capaz de transformar el genoma de la planta mediante la inserción de genes foráneos y de regenerar plantas enteras a partir de células transformadas.

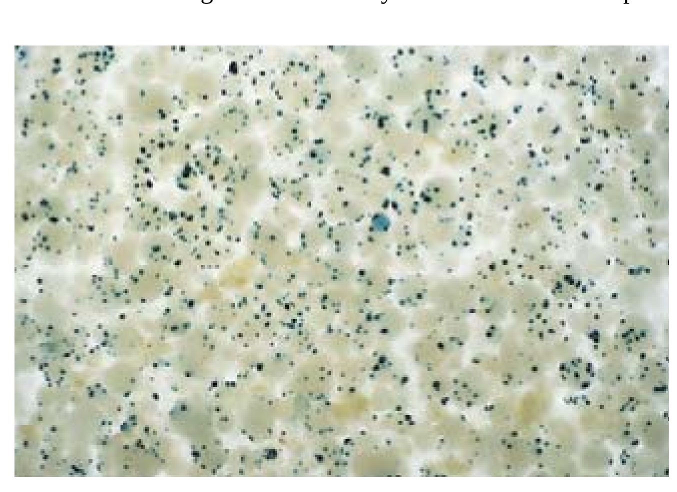
La situación ha sufrido un giro tan repentino cuan esperanzador. En junio del año pasado, *Nature Biotechnology* publicaba tres artículos sobre la regeneración y transformación genética de la yuca. Firmados por laboratorios diferentes, los trabajos demuestran la posibilidad real de la transformación genética de la yuca. Ha comenzado una era prometedora.

Un artículo lo firmaba el equipo de N. J. Taylor, de la Universidad de Bath. Este, con sus colaboradores, desarrolló un nuevo sistema de regeneración por embriogénesis somática. A partir de hojas jóvenes y mediante manipulación de la composición de medios de cultivo, establecieron un sistema donde las células embriogénicas pueden dividirse y generar plantas enteras.

El segundo trabajo fue el nuestro. Se describen en él los resultados de una colaboración, liderada por C. Schöpke, entre el Laboratorio Internacional de Agrobiotecnología Tropical (ILTAB) y la Universidad de Bath. Combinamos el sistema de regeneración desarrollado en Bath con los experimentos en transformación genética de un grupo del Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación (ORSTOM), y del norteamericano Instituto Scripps de Investigación (TSRI). Conjugando ambos métodos nos propusimos transferir material genético foráneo a células de yuca por medio de bombardeo de partículas. La técnica del bombardeo de partículas consiste en recubrir con ADN micropartículas de oro o tungsteno, que luego se disparan de suerte tal que atraviesen las paredes celulares del tejido a transformar.

En general, el porcentaje de células que reciben e integran el ADN foráneo en su genoma, es decir, que experimentan transformación génica, es muy bajo. De ahí que deba procederse a su selección. El ADN usado para transformar tejidos embriogénicos de yuca contiene un gen de resistencia a antibióticos (gen marcador de selección) y un gen que permite la identificación visual de células o tejidos transformados (gen informador). Gracias al gen de resistencia, las contadas células que lo portan y lo expresan están capacitadas para sobrevivir en un medio reforzado con antibiótico; por contra, las células que no lo contienen o no lo expresan se mueren.

Las células bombardeadas de yuca que mostraron resistencia a antibiótico se dividieron y formaron em-



1. Tejido embriogénico de yuca a los tres días del bombardeo de partículas. Habíamos recubierto a éstas con ADN que portaba el gen GUS, cuya presencia en las células bombardeadas puede detectarse en la coloración azul



2. Sección longitudinal del ápice de una planta trangénica de yuca que posee el gen GUS en todas las células. Sometimos las sección a ensayo para detectar la presencia del gen, que se revela en la coloración azulada



3. Plantas transgénicas de yuca generadas a partir de células bombardeadas

briones somáticos. Los embriones se desarrollaron y aparecieron las primeras yucas genéticamente transformadas. Por último, pasaron con éxito al invernadero.

En el tercer artículo, encabezado por H.-Q. Li, del Instituto Suizo Federal de Tecnología (ETH), se describe un sistema alternativo. Implica la inducción de la formación de brotes a partir de cotiledones y la transformación genética mediada por *Agrobacterium*. Esa bacteria, que vive en el suelo, puede bajo condiciones naturales infectar las plantas transfiriendo parte de su ADN. Sacándole partido a esa capacidad de transferencia del ADN propio que posee *Agrobacterium*, el equipo suizo infectó cotiledones de yuca con la bacteria, en la que había genes marcadores de selección y un gen informador. Se regeneraron luego brotes transgénicos que formaron plantitas en un medio de enraizamiento.

Tomados en su conjunto, los resultados obtenidos en las tres líneas de investigación respaldan la tesis sobre la posibilidad de la transformación genética de la yuca a través de métodos de bombardeo de partículas o mediante infección por *Agrobacterium*. De momento, la transformación se ha limitado a los genes de selección y genes informadores. Pero se está trabajando en otros genes de interés agronómico como son los relacionados con la resistencia contra virus e insectos, así como en genes que promueven la calidad del almidón. Cabe esperar que, dentro de un año o de un año y medio, plantemos yucas transformadas con esos genes.

4. Fracción de raíz tuberosa de una planta transgénica de yuca. La zona más densa está rellena de almidón

CHRISTIAN SCHÖPKE, NIGEL TAYLOR, ROSA CÁRCAMO, ROGER N. BEACHY Y CLAUDE FAUQUET
Laboratorio Internacional de Agrobiotecnología, Inst. Scripps de Investigación

Cardiopatías

Diseño de nuevos fármacos

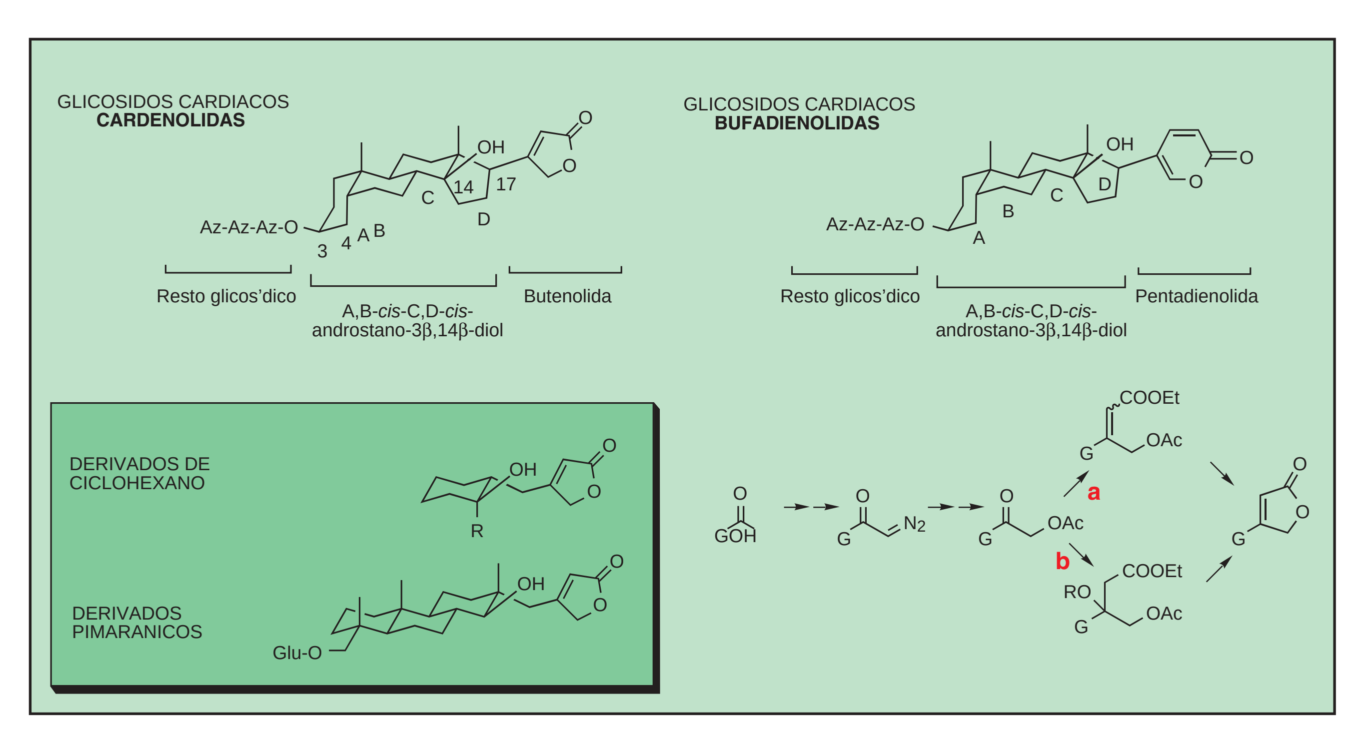
A la insuficiencia cardíaca congestiva se le atribuye un gran número de fallecimientos en personas hospitalizadas y ancianos. Sin constituir una enfermedad en sí misma, esta dolencia es el resultado final de otras enfermedades y episodios cardíacos. Puesto que su incidencia es mayor en la población adulta, cabe prever que su importancia entre las causas de muerte se verá incrementada en el futuro, con la mayor longevidad de la población.

La insuficiencia cardíaca congestiva (ICC) aparece cuando el corazón es incapaz de atender las necesidades del organismo mediante un funcionamiento normal. El corazón aumenta de tamaño y pierde fuerza de contracción, no pudiendo bombear sangre con la eficacia requerida. Aparecida la insuficiencia, el organismo reacciona mediante la constricción de los vasos u otros procedimientos, que a la larga repercuten negativamente incrementando la insuficiencia.

El tratamiento clásico de la ICC va dirigido a reducir los factores que la provocan y a mejorar la función del miocardio. Dicha mejora se puede alcanzar principalmente mediante dos estrategias diferentes: 1) incrementando la eficacia por aumento de la fuerza contráctil y el vaciado del corazón con agentes inotrópicos positivos (cardiotónicos) y 2) limitando la inundación del corazón mediante descanso, reducción de fluidos con diuréticos que favorecen la producción de orina y empleo de vasodilatadores sanguíneos.

La contracción del músculo cardíaco está generada por la interacción entre las proteínas contráctiles del miocardio (miosina y actina) en presencia de iones calcio. Podemos realzar la fuerza de la contracción sensibilizando los elementos contráctiles al Ca^{2+} o elevando la concentración de éste en su proximidad. Dicha concentración también se incrementa si aumentamos la concentración intracelular de iones sodio, lo que provoca el intercambio Na^{+}/Ca^{2+} y una mayor concentración de este último. La concentración de Na^{+} se puede mantener elevada mediante la inhibición de la ATPasa de sodio y potasio, una enzima que rebaja la concentración del Na^{+} intracelular intercambiándolo por K^{+} extracelular.

De los agentes cardiotónicos disponibles, los glicósidos cardíacos



Síntesis de butenolidas a partir de ácidos carboxílicos, vía "Witting" (a) *y vía "Reformatsky"* (b)

siguen siendo indispensables en el tratamiento de la ICC. Su capacidad para aumentar la contractilidad del corazón, rebajando la frecuencia de latido, es una característica de dichos agentes que aumenta el rendimiento del corazón sin deteriorar el miocardio. Los glicósidos cardíacos producen un incremento indirecto de la concentración de Ca^{2+} por inhibición de hasta un 30 % de la actividad de la ATPasa Na^+/K^+, a dosis terapéuticas.

Entre los glicósidos cardíacos se encuentran las cardenolidas, productos naturales que aparecen en diversas plantas, y las bufadienolidas, que forman parte de los venenos de los sapos. Los glicósidos cardíacos más conocidos son los que se obtienen de *Digitalis*, un género de plantas originario de Europa y Asia cuya especie más famosa es la dedalera (*Digitalis purpurea*). Esta planta medicinal, utilizada ya por los egipcios, se ha venido empleando con distintos fines. Su uso en el tratamiento de ICC fue descrito por William Withering en 1785. Desde el punto de vista de su estructura química, las cardenolidas son glicósidos de esteroides; poseen, pues, una molécula de esteroide unida a una o varias moléculas de azúcar. La diferencia entre cardenolidas y bufadienolidas está en la parte de la molécula unida a la posición 17.

A pesar de su utilidad, las cardenolidas encierran una potencia tóxica elevada. La digoxina, la cardenolida de mayor uso en la práctica clínica, es el segundo fármaco causante de mortalidad en pacientes hospitalizados, y el más implicado en provocar readmisiones hospitalarias. Entre las manifestaciones de la toxicidad de las cardenolidas están: fatiga, náusea, vómitos, anorexia, diarrea y otros efectos sobre el sistema nervioso central (SNC), así como alteraciones del ritmo cardíaco potencialmente letales.

Podemos, sin embargo, separar los efectos terapéuticos y tóxicos de las cardenolidas, ya que varía su afinidad para diversos isozimas (variantes de la enzima) de la ATPasa Na^+/K^+, lo que implica diferencias entre los receptores (puntos de unión de la cardenolida a la enzima) en el SNC y en el miocardio. En consecuencia, el estudio de las relaciones entre la estructura molecular de las sustancias y su actividad (REA) en los glicósidos cardíacos está plenamente justificado, con vistas a preparar compuestos con mejor relación actividad/toxicidad y alcanzar otros objetivos, como definir la parte de la molécula responsable de su actividad.

Los estudios de la relación entre estructura y actividad han permitido establecer tres conclusiones. En primer lugar, el resto glicosídico (de azúcares) no es imprescindible para la actividad, aunque contribuye a mejorar la unión al receptor. En segundo lugar, es necesario para la actividad que exista sustitución en C-17, aunque su estructura puede variar. Por último, se acepta que la parte de la molécula que confiere la actividad es el propio núcleo tetracíclico, constituyendo el requisito estructural de los esteroides cardiotónicos para la unión a la ATPasa Na^+/K^+.

Con el fin de descubrir qué partes del sistema esteroide son necesarias para la actividad, se han diseñado moléculas que se están sintetizando actualmente en nuestro laboratorio, y que poseen diversos sistemas estructurales. Para analizar previamente su semejanza con los glicósidos cardíacos, se ha realizado un estudio teórico de sus estructuras mediante ordenador. En el mismo se revela que algunos de estos compuestos son prácticamente superponibles con los glicósidos cardíacos, en cuanto a las partes de la molécula a las que se atribuye la actividad. Con estas premisas se espera obtener compuestos activos, que aporten nueva información sobre los requisitos realmente necesarios para la interacción con el receptor digitálico en la ATPasa Na^+/K^+ y estudiar su posible aplicación en el tratamiento de la insuficiencia cardíaca congestiva.

MANUEL MEDARDE,
FERNANDO TOMÉ,
ESTHER CABALLERO
Y ARTURO SAN FELICIANO
Facultad de Farmacia
Universidad de Salamanca

De espada a arado

Hemolisina de E. coli

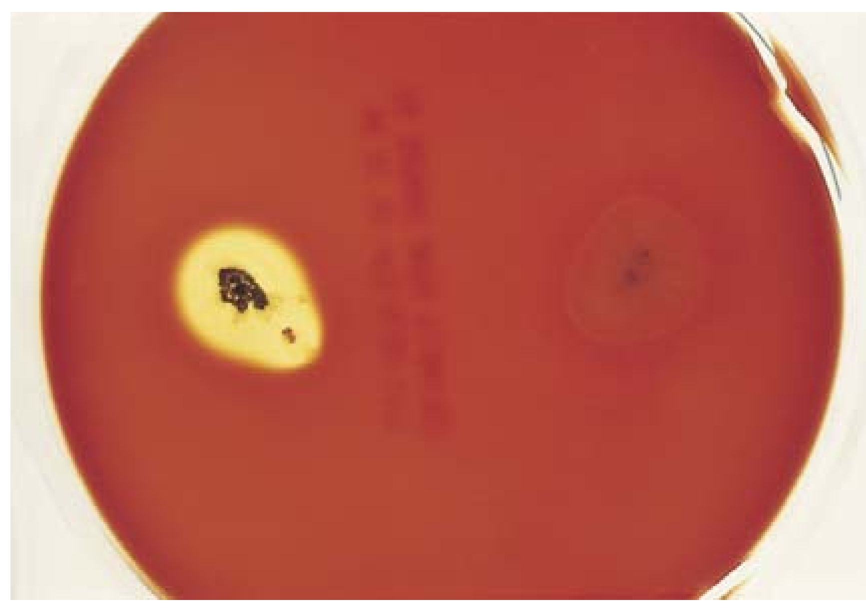
Tal y como lo indica su nombre, las proteínas bacterianas denominadas hemolisinas provocan la lisis de los eritrocitos de la sangre mediante un mecanismo que implica la formación de poros en la membrana celular. Por este motivo, su producción por una variedad de bacterias patógenas se considera uno de los mecanismos más peligrosos de virulencia en humanos y animales.

Las hemolisinas alcanzan un tamaño notable, de más de 100 kilodalton. Para ejercer su acción, deben secretarse al medio externo desde las células productoras. Esta exportación no les resulta nada fácil a las bacterias gram-negativas como *Escherichia coli*, muchas de cuyas cepas virulentas producen hemolisina; en efecto, la proteína debe atravesar una membrana doble con una permeabilidad extremadamente limitada.

A nadie debe, pues sorprender que el sistema de exportación de la hemolisina de *E. coli* haya sido objeto de numerosos estudios en los últimos años, constituido en un paradigma de liberación al medio de proteínas producidas por bacterias. Aunque todavía se sabe poco del mecanismo íntimo del proceso, se han podido analizar los determinantes genéticos, dentro y fuera de la molécula de hemolisina, implicados en el fenómeno.

La secreción al medio de la hemolisina prototípica de *E. coli* requiere no sólo la producción de la molécula (cifrada por el gen *hlyA*), sino también el concurso de al menos tres genes de transporte: *hlyB*, *hlyD* y *tolC*. Los dos primeros se cotranscriben con el gen *hlyA*, en tanto que el tercero es un gen ajeno a la hemolisina que está presente en todas las cepas de *E. coli*. El aspecto más interesante de la exportación de la proteína reside en la interacción de su maquinaria, que reconoce exclusivamente un pequeño dominio de unos 10 kilodalton presente en el extremo C-terminal de la hemolisina y que permite la salida de la molécula entera.

A raíz de varios experimentos realizados hace una década en el laboratorio de B. Holland se demostró que la fusión del dominio C-terminal de la hemolisina con una secuencia peptídica heteróloga permitía en muchos casos la salida al medio de la proteína híbrida. Pese al potencial biotecnológico de esta propiedad, no se había logrado domeñar el sistema y convertirlo en vector para la secreción al medio de proteínas híbridas de interés comercial. Sin embargo, una colaboración reciente entre un equipo alemán del Centro Federal de Biotecnología (GBF) en Braunschweig, encabezado por K. Timmis, y otro español del CSIC en Madrid, dirigido por el autor de este artículo, ha dado como fruto una estrategia para desarrollar vacunas vivas contra patógenos intestinales que se basa precisamente en el mecanismo de secreción de la hemolisina de *E. coli*.



Detección de hemólisis producida por un aislado bacteriano. La foto muestra una placa de Petri con agar-sangre inoculada con una cepa hemolítica (a la izquierda) *y una cepa no-hemolítica* (a la derecha). *Nótese la formación de un halo claro alrededor de la estirpe hemolítica como consecuencia de la lisis de los eritrocitos presentes en el medio de cultivo. (Foto cortesía de J. L. Martínez.)*

Las vacunas vivas a que nos referimos son bacterias atenuadas, en las que se ha inducido mutaciones que limitan su proliferación. Esas vacunas pueden administrarse por vía oral. Capacitadas para colonizar las mucosas, acceden al tejido linfoide del intestino. La presentación en este tejido de antígenos seleccionados de otros patógenos da lugar a una protectora respuesta inmunitaria.

El equipo hispano-alemán ha construido estirpes recombinantes atenuadas de *Salmonella thyphimurium* que exportan muy eficientemente al medio una fusión entre el extremo C-terminal de la hemolisina de *E. coli* (que determina su transporte al exterior celular) y la subunidad IIeB de una toxina similar a Shiga (*Shiga-like toxin*: SLT). Esta proteína es un factor de virulencia en ciertas cepas de *E. coli* que producen edemas en el ganado porcino.

Puesto que *S. thyphimurium* coloniza muy rápidamente la mucosa intestinal y alcanza fácilmente su sistema inmunitario asociado, la estirpe bacteriana recombinante que secreta el antígeno de SLT-IIeB asociado a la señal de transporte de la hemolisina provoca la producción de anticuerpos antitoxina, tal y como los mismos autores han verificado más recientemente. Para ello, cepas recombinantes de *Salmonella* se administraron oralmente a animales de laboratorio con el objeto de permitir la colonización del intestino por bacterias que secretaban al medio el antígeno de interés. Mediante esta operación, las bacterias actúan como vehículos para dirigir estos antígenos al tejido linfoide asociado al intestino. El resultado de esta presentación de los híbridos hemolisina-antígeno al sistema inmunitario es la producción de anticuerpos anti-SLT por el animal tratado. El éxito obtenido en el sistema de exportación de antígenos heterólogos se ha repetido en estirpes de *Shigella dysenteriae* y *Shigella flexneri*.

Esos trabajos nos indican que la combinación entre cepas bacterianas que son colonizadores agresivos (aunque atenuados) del intestino y los sistemas de presentación de antígenos basados en el sistema de transporte de la hemolisina pueden dar lugar a una generación de vacunas orales

con efectos protectores para diversas enfermedades infecciosas. Y en general, estos avances ilustran cómo las herramientas de la ingeniería genética permiten convertir una propiedad de un factor de virulencia particularmente vicioso (la hemolisina) en un instrumento para la producción de vacunas beneficiosas para la salud humana.

VÍCTOR DE LORENZO
Centro Nacional de Biotecnología (CSIC), Madrid

Alcance clínico de la investigación básica

El caso de neumococo

Entre los patógenos humanos, la bacteria *Streptococcus pneumoniae* ocupa un lugar de raro privilegio. Ese neumococo es el causante de otitis medias, neumonías, bacteriemias, meningitis y otras enfermedades graves. Por ceñirnos a los grandes números, se calcula que, aproximadamente, un millón de niños fallecen cada año por episodios de neumonía neumocócica. Dos terceras partes de los niños menores de 3 años sufren un episodio de otitis media supurativa causada por *S. pneumoniae* con frecuentes recidivas, dolencia responsable en buena medida de las sorderas, incluso en países avanzados. Además, el neumococo se ha convertido en el principal agente de las meningitis en adultos.

Si a este panorama general añadimos el hecho de que, en el transcurso de los últimos años, la bacteria ha desarrollado elevados niveles de resistencia frente a un gran número de antibióticos y principalmente frente a los β-lactámicos, entenderemos la razón de la alarma creciente en todo el mundo. *S. pneumoniae* está rodeado por una cápsula. Esta envuelta externa polisacarídica constituye su principal factor de virulencia: si la bacteria perdiera ese escudo, lo que ocurre en los mutantes acapsulados, entonces se tornaría virtualmente inocua. Se conocen ya 90 serotipos capsulares que difieren entre sí por su estructura química. Contamos también con una vacuna formada por una mezcla de los 23 polisacáridos capsulares más frecuentes.

Aunque la vacuna se emplea en algunos países, no protege a los dos grupos de riesgo principales, a saber, los niños menores de 3 años y las personas de más de 65. En este último segmento, la ineficacia obedece a la incapacidad progresiva de los mecanismos inmunitarios de defensa para desarrollar anticuerpos. Por otra parte, varios de los polisacáridos incluidos en la vacuna 23-valente son *per se* poco inmunogénicos. Por lo que respecta a la población infantil, hay que tener en cuenta que los polisacáridos son antígenos que no dependen del timo y, en consecuencia, no inducen respuesta en individuos inmunológicamente inmaduros, ni tampoco evocan el fenómeno de memoria inmunitaria.

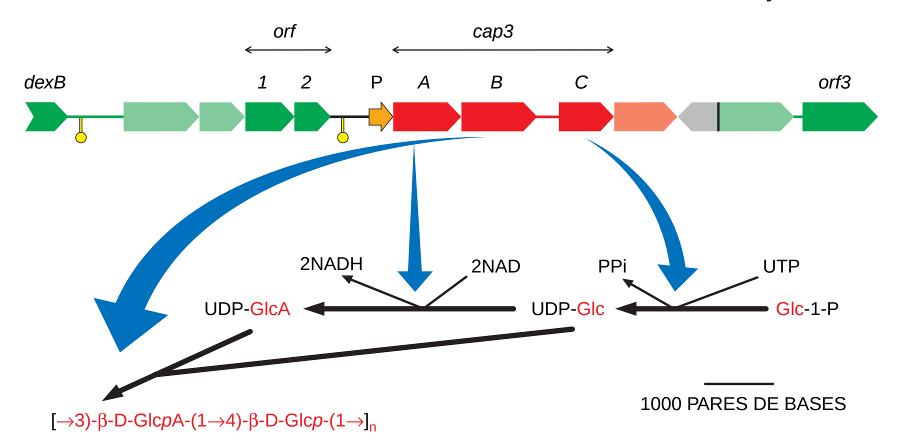
Resulta, pues, evidente que el conocimiento de las bases moleculares de la síntesis de los polisacáridos capsulares del neumococo puede aportar datos valiosos para comprender su enorme variabilidad y, a la postre, para desarrollar nuevas moléculas capaces de inhibir su síntesis. A pesar de que el estudio de los genes capsulares sirvió para determinar que el ADN constituía la base química de la herencia, sólo muy recientemente se ha podido disponer de técnicas de biología molecular para abordar la organización molecular de tales genes. Como modelo se eligió el serotipo 3, que es el más frecuentemente aislado en infecciones sistémicas en adultos.

El polisacárido de tipo 3 presenta una composición química muy sencilla. Consta de unidades de ácido celobiurónico engarzadas por enlaces β(1 → 3). El ácido celobiurónico es un disacárido formado por ácido D-glucurónico (GlcA) unido a D-glucosa (Glc) mediante enlaces β(1 → 4).

Estudios llevados a cabo durante los años cincuenta y sesenta habían puesto de manifiesto que los azúcares del polisacárido capsular debían primero activarse mediante la síntesis de nucleótidos de azúcar, normalmente bajo la forma de derivados de uridín difosfato (UDP-Glc y UDP-GlcA en el caso del serotipo 3 de neumococo).

En nuestro laboratorio se ha conseguido clonar y secuenciar una región de unas 14.000 pares de bases (bp) que contiene los correspondientes genes capsulares y sus regiones flanqueantes. Tras experimentos genéticos y de hibridación de ácidos nucleicos demostramos la existencia de un operón compuesto por 3 genes que estaban vinculados al serotipo, es decir, que sólo se encontraban en cepas de neumococo del serotipo 3. (A esos genes serotipo-específicos los denominamos *cap3A*, *cap3B* y *cap3c*). Por contra, las regiones de ADN que flanqueaban al operón estaban presentes en el ADN de neumococos pertenecientes tanto al tipo 3 como a los demás serotipos. (En justa coherencia se les llamó "comunes".)

Comprobamos también, en experimentos de inactivación génica mediante inserción de genes y duplicación de los mismos, que sólo *cap3A* y *cap3B* eran imprescindibles para la producción de la cápsula de tipo 3. Comparamos luego las secuencias de las proteínas cifradas por los genes *cap3ABC* con las secuencias existentes en las bases de datos, y observa-



Organización de la región del ADN en una cepa de neumococo que contiene los genes responsables de la biosíntesis de la cápsula de tipo 3. Las flechas verdes corresponden a regiones comunes a todos o a varios de los serotipos, mientras que las rojas indican los genes serotipo-específicos. Los genes defectivos se indican en tonos claros y, en gris, se muestra un fragmento de una secuencia de inserción. La flecha naranja indica el promotor P del operón cap3ABC. También se muestran los terminadores de transcripción ( ). En la parte inferior de la figura se detalla la ruta de síntesis del polisacárido capsular. Las flechas azules señalan las reacciones catalizadas por las proteínas sintetizadas a partir de los genes del operón cap3

mos que los polipéptidos Cap3A y Cap3C podrían corresponder, respectivamente, a sendas enzimas: una UDP-Glc deshidrogenasa (UDP-GlcDH) y una UDP-Glc pirofosforilasa. Aquélla sería la responsable de la oxidación de UDP-Glc en UDP-GlcA y, ésta, de la síntesis de UDP-Glc a partir de Glc-1-P y UTP. Por último, procedimos a la clonación de los genes *cap3A* y *cap3C*, y su posterior expresión, en *Escherichia coli*. Las proteínas sobreexpresadas se sometieron a diversos análisis bioquímicos que confirmaron las hipótesis de partida.

Por su parte, el gen *cap3B* parecía determinar una glicosil transferasa, es decir, una enzima con función sintetizadora y capaz de unir los eslabones (GlcA y Glc) del polisacárido de tipo 3 de neumococo. Ahora bien, las transferasas suelen ser enzimas dotadas de una altísima especificidad. ¿Cómo iba, pues, la nuestra a sintetizar tanto los enlaces $\beta(1 \rightarrow 4)$ de las unidades de ácido celobiurónico como los $\beta(1 \rightarrow 3)$ que unen estas unidades entre sí?

El gen *cap3B* se clonó y se sobreexpresó en *E. coli*. Quedó con ello demostrado que, en tales condiciones, la cepa huésped era capaz de sintetizar un polisacárido de alto peso molecular indistinguible, desde el punto de vista inmunológico, del polisacárido capsular de neumococo de tipo 3.

Dado que *E. coli* sintetiza UDP-Glc (un precursor universal para la síntesis de todo tipo de polisacáridos) y UDP-GlcA (precursor de la cápsula de ácido colánico de este microorganismo), se pensó que, si el gen *cap3B* se expresaba en estirpes de neumococo no pertenecientes al serotipo 3 pero que sintetizasen también UDP-GlcA, podrían obtenerse estirpes de neumococo binarias, es decir, capaces de sintetizar simultáneamente dos cápsulas diferentes. Para corroborar esa posibilidad, recurrimos a un proceso de transformación genética: se introdujo el gen *cap3B* en estirpes de neumococo pertenecientes a los serotipos 1, 2, 5 y 8; éstos produjeron, además de la cápsula propia, otra de serotipo 3, cuya identificación se obtuvo a través de métodos habituales en la inmunología.

El hecho de que un solo gen sea capaz de inducir la síntesis de una macromolécula de las características de la cápsula de neumococo abre nuevas vías de investigación en el aislamiento de sustancias inhibidoras de dicha producción que permitan así desarmar la toxicidad de la bacteria. Por otra parte, esta línea de trabajo puede llevar a comprender mejor el fenómeno de cambio de serotipo que recientemente se ha observado en *S. pneumoniae*, transformación que proporciona al patógeno una eficaz vía de escape del sistema inmunitario y añade una nueva complicación clínica en cepas resistentes a la penicilina.

E. GARCÍA, C. ARRECUBIETA Y R. LÓPEZ
Centro de Investigaciones Biológicas, CSIC, Madrid

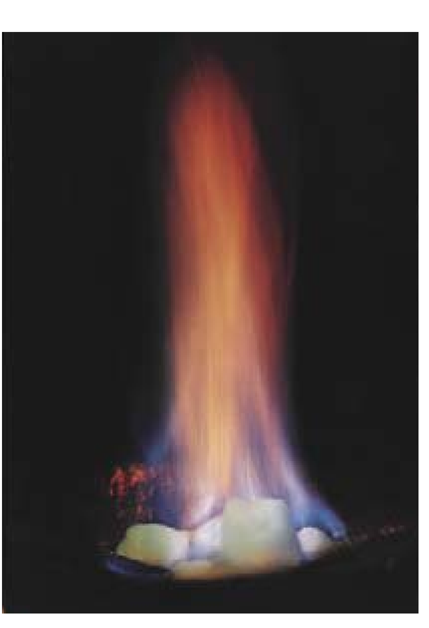
Duro de derretir

El hielo se derrite cuando se le saca de sus predios, siempre bajo cero. Algunos tipos de hielo no. Se ha descubierto que el hielo corriente puede seguir siendo sólido a cinco grados de temperatura y, quizá, hasta a 18.

A Laura A. Stern, Stephen H. Kirby y William B. Durham se les debe ese descubrimiento fortuito. Estudiaban una sustancia hallada en las lunas del sistema solar exterior y en los fríos sedimentos del suelo oceánico: el clatrato de metano. Posee éste una estructura reticular de moléculas de agua que encierra metano en sus cavidades. Para hacer una piedra de clatrato molieron hielo hasta pulverizarlo, lo mezclaron con metano en un cilindro y lo expusieron a un calentamiento ligero.

Menos denso que el agua líquida, el hielo ocupa un volumen mayor. Esperaban ellos que la presión descendiese cuando el hielo se derritiera y dejase más espacio disponible. (La reacción del agua con el metano debería haber reducido aún más la presión.) Pero no observaron una caída brusca de la presión. Tampoco detectaron la absorción de calor que señala que el hielo se está derritiendo.

"En ese momento me quedé con la boca abierta", cuenta Stern. "Pensé que sería un efecto espurio del sistema." Al repetir el proceso, ahora con neón, vio que al llegar al punto de fusión del hielo la presión caía rápidamente. El metano permitía, en cambio, que el hielo se sobrecalentara, es decir, que se calentara más allá de su punto de fusión sin derretirse.



Hielo y fuego: una sustancia parecida al hielo, el clatrato de metano, arde

Creen los autores que cada grano de hielo adquirió una corteza de clatrato de metano. Durante el calentamiento, el hielo de la superficie es el primero que se funde. Las primeras gotas se transformaron instantáneamente en clatrato. Es decir, la corteza actuó de escudo, al evitar que el agua tocase el hielo del interior y se desencadenara la conversión del grano en líquido.

La temperatura de fusión es la temperatura a la que un líquido y un sólido están en equilibrio: si no hay líquido no hay fusión. Otra razón por la que estos granos se sobrecalientan es que muestran pocos defectos: los fallos de la estructura cristalina del hielo pueden poner en marcha la transformación en gotas líquidas.

Se observó un fenómeno similar en 1986 con unos cristales de plata recubiertos de oro. Y si el agua, sometida a presión, se hiela de forma que adopte distintas configuraciones cristalinas —a saber, del hielo II al hielo X—, soportará condiciones bastante tórridas (hasta 70 grados de temperatura). Pero llegar a una temperatura anormal con el hielo ordinario, o hielo I, es de matrícula de honor. "Otros han visto sobrecalentamientos de unos pocos grados", señala Stern. "Nosotros vamos a verlo quizá de 18." Tienen pensado repetir el experimento con granos de hielo mayores, para descubrir si el efecto crece. La termodinámica clásica constituye una caja de infinitas sorpresas.

Madhusree Mukerjee

Industria de la construcción

Nuevos materiales comunes

Hace unos 2000 años, los albañiles emplearon materiales avanzadísimos entonces en la enorme cúpula de hormigón que coronaba un nuevo templo de la capital del Lacio. Hoy el techo del Panteón sigue entero. Más. Se está endureciendo, ya que los compuestos de calcio de la estructura reaccionan gradualmente con el dióxido de carbono para formar caliza y otros minerales cuya resistencia supera la del hormigón. A mediados del año pasado, Roger H. Jones, un ingeniero de Reno, patentó un método económico para acortar, de miles de años a minutos, el proceso de endurecimiento. De acuerdo con los primeros ensayos, tal innovación podría afectar a productos muy diversos, desde un cartón de enlucido de paredes más barato hasta depósitos más seguros para residuos radiactivos.

La lentitud con que fragua el hormigón se debe al agua, que sella los poros de forma hermética para el dióxido de carbono del aire. "Pero un artículo del *Scientific American* sobre el uso de CO_2 a alta presión en la fabricación de plásticos económicos me hizo reflexionar", nos comenta Jones. "Tomé mi olla a presión, la envolví en alambre y me puse a tantear." Descubrió que, sometiendo hormigón mezclado con cemento portland a la acción de CO_2 a alta presión, expulsaba el agua del material y alteraba su composición química. Las pruebas corrientes de compresión muestran que, en promedio, el tratamiento aumenta la resistencia del cemento portland en un 84 por ciento. Subsiguientes experimentos en el Laboratorio Nacional de Los Alamos han corroborado que el proceso puede transformar materiales baratos —entre ellos algunos de los hoy considerados desperdicios— en formas resistentes y aprovechables.

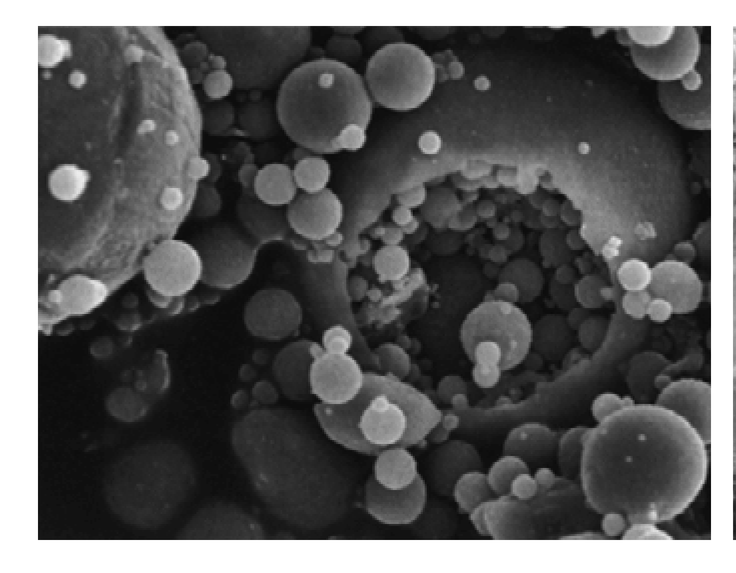
Para F. Carl Knopf, profesor de ingeniería química en la Universidad estatal de Luisiana, resulta sorprendente que no se diera antes con un proceso tan elemental. Elevando la presión hasta unas 75 veces la atmosférica normal y la temperatura hasta unos 31 grados Celsius, el dióxido de carbono adquiere la densidad de un líquido; pese a ello, mantiene la compresibilidad del gas. En ese estado supercrítico, observa Craig M. V. Taylor, de la unidad de fluidos supercríticos de Los Alamos, el CO_2 carece de tensión superficial y puede penetrar en los poros y grietas de una substancia sin encontrar resistencia. Reacciones que suelen durar miles de años transcurren en breves minutos.

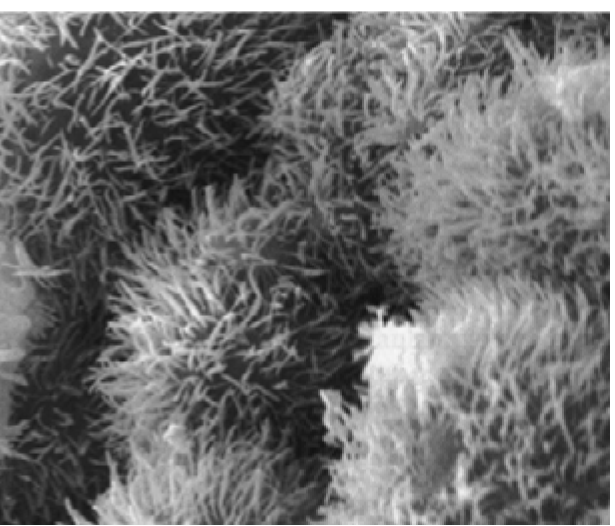
Ante el cemento ultrarresistente se abren prometedoras aplicaciones. Se habla de que el proceso podría evitar la lixivación de residuos nucleares que se han mezclado con cemento común para almacenamiento. No será, sin embargo, un camino de rosas. Jones trabaja ahora en la preparación de tejas de cemento para techar para la empresa Boral de Rialto, California. Las tejas de cemento son más resistentes y duraderas que las de arcilla cocida; además, las tejas tratadas con CO_2 alcanzarán la ligereza que les permita competir con las corrientes.

En los planes de Jones entra el fabricar materiales de construcción con las cenizas producidas por centrales térmicas de carbón. Mezcladas con silicato de sodio, óxido de calcio y agua, la ceniza forma una pasta que, al secarse, produce un material débil y soluble en agua. "Pero cuando hacemos reaccionar esta pasta con CO_2 supercrítico, se hace muy resistente, muy estable y completamente insoluble en agua. Un vano de prueba de 30 centímetros puede soportar 240 kilogramos, comparable al cemento reforzado con fibra de vidrio", me comenta. Salta a la vista la conveniencia de edificar una instalación de procesamiento junto a una central térmica, que produce cantidades ingentes de CO_2 y cenizas. Ahorarrían a ésta los vertederos de cenizas; se dispondría de electricidad barata para alimentar la instalación y podría aprovecharse el calor desperdiciado en la chimenea.

"Esto abre un área completamente nueva de ciencias de materiales", asegura su colega Taylor. En recientes experimentos, él y Jones han mostrado que, disolviendo metales o plásticos en el fluido supercrítico, pueden impregnar cementos con otros compuestos para hacerlos más duraderos, flexibles o eléctricamente conductores. El proceso elimina de la atmósfera un gas de invernadero y recicla las cenizas de carbón transformándolas en materiales con los que construir viviendas.

W. WAYT GIBBS





Partículas de ceniza (izquierda) *convertidas mediante CO_2 a alta presión en filamentos para producir un material de construcción más duradero y denso* (derecha)

De cerca

Fotos y texto: Albert Masó

¿Animal o vegetal?

Contemplando el desierto del Kalahari, se distingue una protuberancia que podría ser uno más de los numerosos arbustos resecos que se encuentran por toda la estepa. Al acercarse se distingue un penacho que esconde algo. Y, en efecto, hay un animal. Pero ¿qué tipo de animal puede aguantar tranquilamente a pleno sol?

Pues una ardilla con parasol. Se trata de una ardilla que, al no existir bosques en este ambiente, se ha convertido en terrestre. Está perfectamente adaptada a buscar, desenterrar y roer cómodamente bajo el tórrido sol porque se protege con la exagerada cola. Esta se recalienta mucho pero, debido a que está formada por pelos y no tiene apenas irrigación, no transmite el calor al cuerpo, por lo que la termorregulación necesaria no se ve afectada.

La mayor parte de los animales del desierto tienen actividad nocturna y ello, básicamente, por tres razones: para facilitar la regulación de la temperatura corporal, para dificultar la localización de los depredadores y para evitar la deshidratación (fácil de caer en ella por el intenso calor y difícil de compensar por la falta de agua disponible). Pues bien, nuestra ardilla, cuyo nombre científico es *Xerus inauris*, es diurna. El problema de la termorregulación y deshidratación ya hemos dicho cómo lo resuelve, el agua la consigue de los bulbos, raíces y demás material vegetal que ingiere, y para eludir los depredadores tiene una estrategia particular.

Esta se basa en la vida social que tiene este roedor: construye largas galerías en las que viven varias familias y tienen múltiples entradas, de manera que raramente está lejos de una de ellas que le pueda poner a buen recaudo. Además, en ellas hace mucho menos calor que en la superficie, lo que contribuye a cumplir los otros requisitos de la vida en el desierto.

Técnica fotográfica: La primera fotografía (abajo) *se tomó con un gran angular de 20 mm para captar la mayor área posible de paisaje. Colocada la cámara en un trípode, la velocidad de obturación pudo ser baja (1/8 seg.), lo que permitió usar un diafragma cerrado: f. 16. Así fue posible que no sólo quedase nítido el animal, sino también un amplio sector del terreno. La segunda toma se hizo con un teleobjetivo de 400 mm, con diafragma f. 8 y a un tiempo de obturación de 1/125 para evitar la vibración de la cámara, que estaba apoyada y con el parasol colocado.*





Suicidio celular, en la salud y en la enfermedad

Las células están capacitadas para suicidarse. A menudo lo hacen. Esa apoptosis es imprescindible para el buen funcionamiento de nuestro cuerpo. Pero, ¿qué ocurre cuando se altera el proceso autodestructor normal?

Richard C. Duke, David M. Ojcius y John Ding-E Young

Mientras usted lee este artículo, las células de su cuerpo se mueren a millones. Pero no se asuste, la mayoría se autosacrifican para que usted sobreviva. Investigaciones recientes indican que la salud de todos los organismos pluricelulares, incluidos los humanos, depende no sólo de que el cuerpo sea capaz de producir nuevas células, sino también de que sus células puedan autodestruirse cuando no sirven para nada o sufren una alteración. Este proceso crítico, que ahora se denomina apoptosis, o muerte celular programada, pasó inadvertido durante décadas. Pero en los últimos años los biólogos han realizado notables progresos en el conocimiento de cómo se lleva a cabo y controla el suicidio celular.

La motivación de muchos investigadores es doble. Por una parte, la curiosidad científica y, por otra, el deseo de combatir algunas de las enfermedades más temidas. La regulación aberrante de la apoptosis —que puede determinar un exceso o un defecto de suicidio celular— contribuye probablemente a patologías muy dispares, del cáncer a la artritis reumatoide pasando por el sida y la enfermedad de Alzheimer.

RICHARD C. DUKE, DAVID M. OJCIUS y JOHN DING-E YOUNG han consagrado muchos años al estudio de la muerte celular. Duke enseña inmunología en la Universidad de Colorado. Ojcius empezó a interesarse por la apoptosis a finales de los ochenta, durante su estancia posdoctoral en el laboratorio de Young, en la Universidad Rockefeller. Hoy es investigador de plantilla del Instituto Pasteur. Young comparte la presidencia de Inteplast Corporation con sus clases en la Rockefeller.

Quienes investigaban el desarrollo embrionario en la primera mitad del siglo XX se percataron ya de que la muerte celular no era, como se había pensado, forzosamente mala para el cuerpo. Antes bien, resultaba imprescindible. En los años cincuenta se demostró que ciertos organismos pluricelulares alcanzaban su morfología final eliminando determinadas células seleccionadas. El renacuajo se desprende de su cola durante el proceso de metamorfosis en rana. Los mamíferos pierden innumerables neuronas durante el proceso de formación del sistema nervioso. Los microscopistas habían identificado también las principales señales indicadoras que distinguían esta muerte celular fisiológica de la mera destrucción accidental, o necrosis.

La muerte necrótica ocurre cuando una célula sufre un daño grave, causado tal vez por un golpe físico o por falta de oxígeno. La hinchazón es una señal característica. Los orgánulos internos, así las mitocondrias (las factorías energéticas celulares), y toda la célula se hinchan y cuartean. Estos efectos ocurren porque los daños impiden que la célula controle adecuadamente su balance de fluidos y iones. El agua y las partículas cargadas (especialmente iones de sodio y calcio), que en condiciones de normalidad se bombean hacia fuera, ahora entran a raudales. Otra señal es la inflamación: los macrófagos circulantes y otros glóbulos blancos del sistema inmunitario convergen en las células necróticas y las ingieren. La inflamación coadyuva a limitar la infección y eliminar los restos, pero la acción y las secreciones de los glóbulos blancos pueden lesionar también el tejido normal de la vecindad, y a veces bastante.

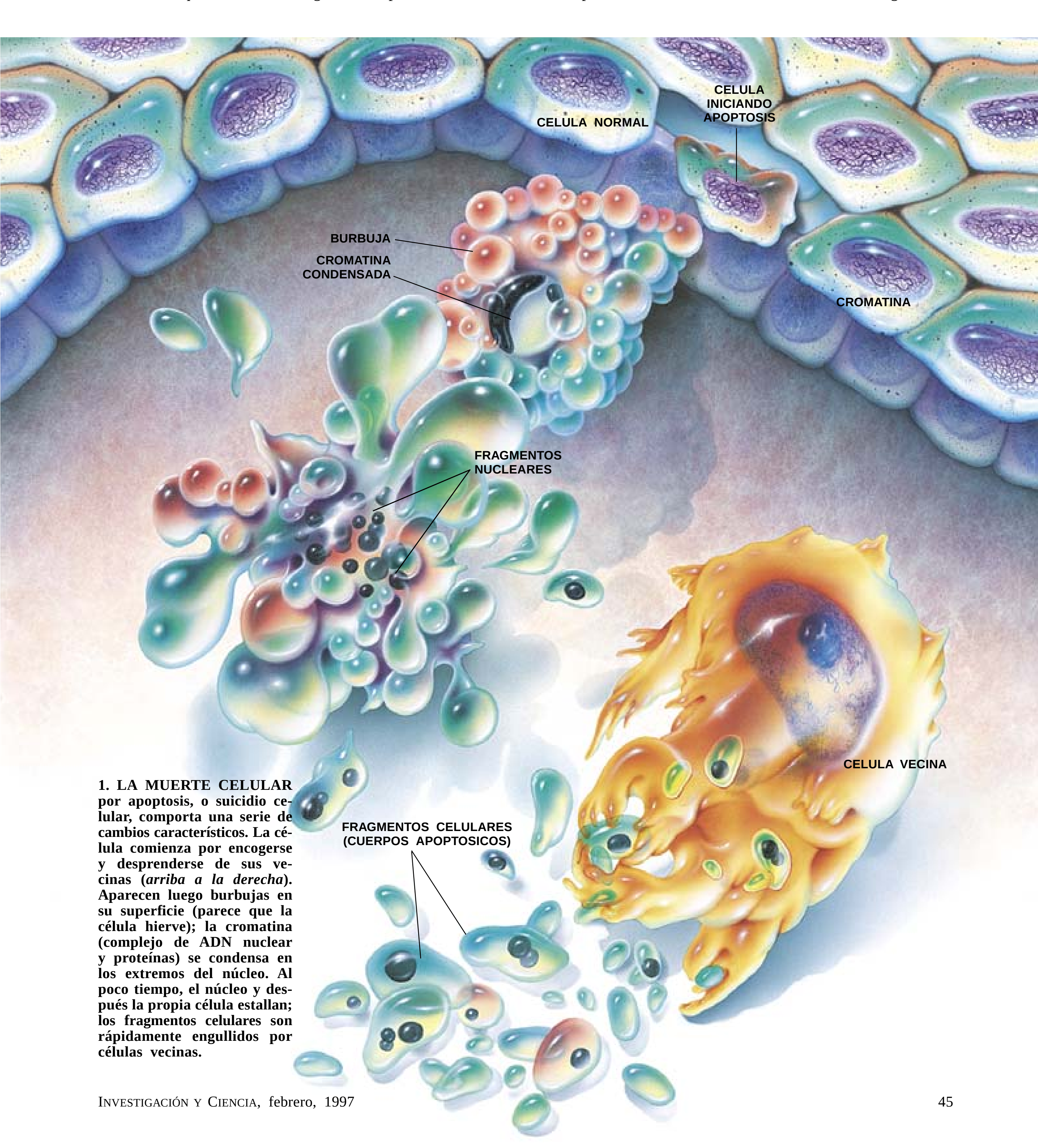
Los científicos que estudian células que sufren apoptosis aprecian cambios muy distintos. No observan hinchamiento. Ven que las células que se están muriendo se encogen y se apartan de sus vecinas. Al poco tiempo parece que hierven: se forman unas burbujas en la superficie, que desaparecen, sustituidas de inmediato por otras nuevas burbujas. Los orgánulos internos retienen su estructura, pero el núcleo, que se altera poco en la necrosis, cambia espectacularmente durante la apoptosis. Uno de los cambios más notables afecta a la cromatina (ADN cromosómico y proteínas), que en una situación normal está dispersa y durante el proceso apoptósico se condensa formando una o varias manchas cerca de la membrana nuclear.

En este punto, las células apoptósicas suelen ingerirse por células cercanas o por células carroñeras, que se encuentran en todos los tejidos, sin que se produzca una respuesta inflamatoria. Las células que se están muriendo y no se ingieren pueden sufrir nuevos cambios. El núcleo se desintegra y las células se dividen en numerosos “cuerpos apoptósicos”, que pueden contener una o dos piezas nucleares. Como antes, estos cuerpos se eliminan discretamente. (A finales de los años setenta, los estudios bioquímicos escribieron otra página de la apoptosis: la cromatina suele disgregarse en fragmentos que producen un patrón similar a los peldaños de una escalera cuando dichos fragmentos se separan por tamaños en geles sometidos a electroforesis.)

Curiosamente, ciertas células que sufren muerte celular programada

no se engullen. Hoy sabemos que persisten largo tiempo, si no indefinidamente. El cristalino del ojo, por ejemplo, está formado por las carcasas de células que sustituyen la mayor parte de su citoplasma por la proteína cristalina, cuando mueren. En la piel, las células denominadas queratinocitos se generan a partir de precursores de una capa más profunda, y después emigran hacia la superficie, muriendo en el camino. En vez de cristalina, reemplazan su contenido por queratina, una proteína resistente, y adquieren una cubierta que repele el agua. Estas células muertas constituyen la capa protectora externa de la piel, hasta que se caen, reemplazadas por otros queratinocitos.

Aunque la mayoría de los eventos apreciables que definen la apoptosis quedaron ya corroborados en los años cincuenta y se conocía su función en el desarrollo embrionario, la importancia de la apoptosis en el mantenimiento diario del organismo



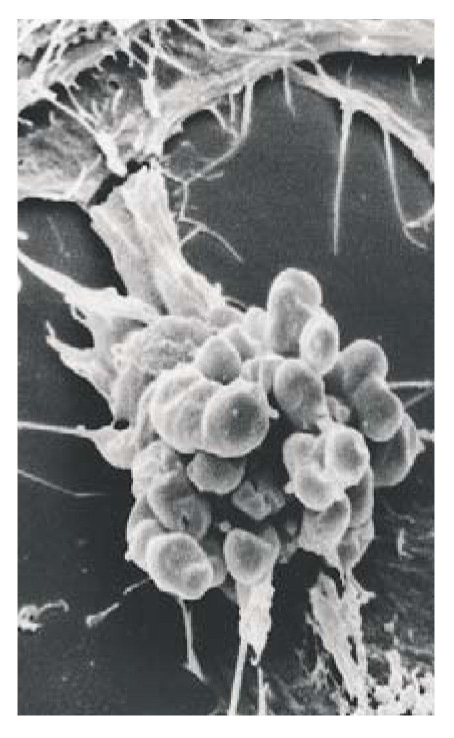
1. LA MUERTE CELULAR por apoptosis, o suicidio celular, comporta una serie de cambios característicos. La célula comienza por encogerse y desprenderse de sus vecinas (*arriba a la derecha*). Aparecen luego burbujas en su superficie (parece que la célula hierve); la cromatina (complejo de ADN nuclear y proteínas) se condensa en los extremos del núcleo. Al poco tiempo, el núcleo y después la propia célula estallan; los fragmentos celulares son rápidamente engullidos por células vecinas.

maduro seguiría sin reconocerse durante veinte años más. El patólogo australiano John F. R. Kerr y sus colegas escoceses Andrew H. Wyllie y Alastair Currie abrieron un nuevo surco con un trabajo publicado en 1972.

En dicho artículo, afirmaban que el mismo tipo de muerte celular que era evidente durante el desarrollo, acontecía también en organismos maduros y durante toda la vida. Sugerían que, a diferencia de la necrosis, donde la célula es una víctima pasiva, esta forma de muerte es activa, y requiere que la célula gaste energía en su propio ocaso. Los investigadores proponían, además, que una iniciación inadecuada del suicidio celular, o su inhibición, podría contribuir a muchas enfermedades, cáncer incluido. Fueron ellos quienes, aconsejados por un colaborador, adoptaron el término griego *apoptosis* para distinguir este tipo de muerte celular de la *necrosis* ("causar la muerte"). En griego clásico, apoptosis significa "caerse" ("morirse"), como caen los pétalos o las hojas en otoño.

A pesar de la profundidad de las ideas de la publicación de 1972, sus observaciones durmieron en el limbo durante más de una década, hasta que los pocos grupos que a la sazón seguían la pista de la apoptosis comenzaron a confirmar las predicciones del artículo. Encontraron signos del carácter progresivo de la apoptosis y de que su ausencia podría favorecer el cáncer. Los investigadores empezaron a señalar con precisión algunas de las moléculas que intervienen en el proceso y en su regulación.

Hay ahora muchos expertos empeñados en descifrar con exactitud cómo y cuándo las células se autodestruyen. Quedan cuestiones pendientes, pero se han descubierto ya algunos principios fundamentales. La mayoría de las células, si no todas, fabrican una serie de proteínas que se utilizan como armas autodestructivas. Mientras una célula es útil para el cuerpo, la maquinaria letal permanece silente. Pero si la célula resulta infectada, se torna maligna o amenaza la salud del organismo, se liberan las proteínas letales.



2. BURBUJAS de la superficie de una célula apoptósica, vistas en una espectacular electromicrografía de barrido.

La apoptosis puede ponerse en marcha de varias maneras. Por ejemplo, cuando una célula deja de percibir las señales químicas (factores de crecimiento o supervivencia) que le permiten comunicarse con otras y reafirmarse en la importancia del papel que lleva a cabo. También puede ponerse en marcha cuando una célula recibe mensajes externos o internos que anulan las señales anteriores; o cuando las células reciben órdenes contradictorias sobre si deben o no dividirse.

En algunos tipos celulares, la puesta en marcha de los mecanismos apoptósicos es predecible. Los queratinocitos que migran a la superficie de la piel están muertos y desaparecen aproximadamente a los 21 días de comenzar su viaje. Sin embargo, esas mismas células, así como las que están destinadas a durar toda la vida (neuronas y células del músculo esquelético), pueden morir prematuramente si se tornan conflictivas. Las quemaduras solares, por ejemplo, pueden provocar apoptosis en los queratinocitos que aún no han llegado a su destino en la piel.

En todos los tipos celulares y en todos los organismos pluricelulares estudiados hasta la fecha, las armas suicidas son unas enzimas que degradan proteínas. Se denominan proteasas "de tipo ICE", porque estructuralmente se parecen a la enzima transformadora de la interleucina 1, o ICE ("interleukin-1 converting enzyme"), que fue el primer miembro del grupo que se descubrió. Las proteasas de tipo ICE que destruyen a las células son como una colección de cuchillos afilados, que se mantienen envainados en condiciones de normalidad. Cuando las enzimas se activan (las hojas se desenvainan), destruyen otras proteínas y, con ello, las células. Algunas de las proteínas lisadas son componentes estructurales esenciales de la célula. En otros casos, los cortes producidos por las proteasas conducen directa o indirectamente a la destrucción del material genético, impidiendo, por tanto, el propio mantenimiento de la célula.

A pesar de que todas las células tienen la misma maquinaria letal, las señales que llevan a la autodestrucción de unas y otras pueden ser distintas. La facilidad y rapidez con que se activa el programa mortal puede variar también de un tipo celular a otro y de un estado de desarrollo a otro en una misma célula. Y una célula concreta puede ser sensible a varios tipos de señales inductoras. Entre los objetivos principales de

RANA

GUSANO

HUMANO

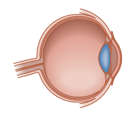
3. EL DESARROLLO NORMAL de los organismos pluricelulares depende de la supresión de ciertas células mediante apoptosis. El gusano *Caenorhabditis elegans* (*arriba*), que mide sólo un milímetro de longitud, elimina exactamente 131 de sus 1090 células durante el proceso de maduración de la forma hermafrodita a la forma adulta. El paso de renacuajo a rana supone eliminar las células de la cola. Se piensa que los embriones humanos utilizan la apoptosis para eliminar las membranas interdigitales.

la investigación actual está el de especificar la gama de inductores apoptósicos y descifrar cómo activan a las destructivas proteasas de tipo ICE. Se sabe que las instrucciones que portan los inductores se transmiten a las proteasas a través de una serie de intermediarios y que diferentes inductores pueden recurrir a intermediarios distintos. Pero, en la mayoría de los casos, se desconocen las cadenas de interacciones, o rutas de señales, que intervienen en el proceso. Tampoco se ha avanzado en el desciframiento de las moléculas que activan directamente a las proteasas.

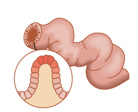
Podemos hacernos una idea de los progresos realizados analizando cómo se suicidan los linfocitos *T* en diferentes estadios de su ciclo vital. Las células *T* son protagonistas estelares de la respuesta inmunitaria contra virus y otros microorganismos invasores.

Células apoptósicas en el adulto

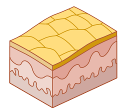
Casi todos los tejidos portan células apoptósicas en algún momento. Las células suelen suicidarse por el bien del cuerpo. La lista de ejemplos que aquí se presenta no es exhaustiva.



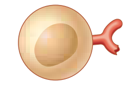
Ojo. El cristalino, que se forma durante el desarrollo embrionario, está constituido por células apoptósicas que han sustituido sus propias tripas por cristalina, una proteína.



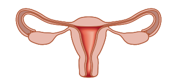
Intestino. Las células que componen las proyecciones digitiformes de la pared intestinal se producen en la base de los “dedos” y, a los pocos días, viajan hacia el extremo. Allí mueren y desaparecen.



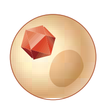
Piel. Las células de la piel comienzan su vida en las capas más profundas y después emigran a la superficie, sufriendo apoptosis por el camino. Las células muertas forman la capa exterior protectora de la piel.



Timo. Los linfocitos *T*, leucocitos que son componentes críticos del sistema inmunitario, maduran en el timo. Los que pueden ser inútiles o pueden llegar a atacar al propio tejido, se suicidan antes de alcanzar el torrente sanguíneo.



Utero. Cuando las células de la pared uterina mueren y se pierden durante la menstruación, la apoptosis es la causa.



Otras. Las células que resultan infectadas por un virus o portan mutaciones genéticas irreparables acostumbran suicidarse. Cuando una célula genéticamente alterada no se suicida, puede devenir en cancerosa.

Las células *T* se producen a partir de precursores, en la médula ósea. Las células inmaduras emigran después al timo, donde los timocitos, nombre que entonces reciben, se especializan. Durante este proceso despliegan en sus membranas las moléculas receptoras que más tarde permitirán a las células *T* maduras detectar las infecciones. Para cumplir su función beneficiosa, las células *T* deben fijarse a los antígenos microbianos (proteínas marcadoras que señalan la presencia de un invasor), a través de sus receptores. Deben también ignorar a las sustancias elaboradas por el propio cuerpo, ya que las células *T* autorreactivas pueden destruir los tejidos normales. Sólo los timocitos que fabrican receptores útiles madurarán y pasarán al torrente sanguíneo, para patrullar por todo el cuerpo.

Mientras se hallan en el timo, los timocitos que no son capaces de fabricar receptores funcionales sufren apoptosis, ya que no van a ser útiles. Los timocitos también se autodestruyen si sus receptores se unen con mucha fuerza a moléculas presentes en el timo. Una unión de ese tipo es señal de que las células pueden más tarde atacar el tejido sano y destruirlo (autoinmunidad).

Las células *T* maduras que logren entrar en circulación permanecen en estado latente, a menos que encuentren el antígeno identificable por receptores celulares. Las células latentes, igual que los timocitos y muchas células más, son sensibles a otros inductores del suicidio: rayos X (en radioterapia contra el cáncer) y otros agentes que dañan el ADN. Las lesiones inducidas provocan que las células sinteticen p53, proteína que activa el programa de suicidio. Durante un tiempo se pensaba que, para autodestruirse, todas las células debían sintetizar p53 u otras proteínas. La síntesis de proteínas se exige en muchos casos, aunque no siempre.

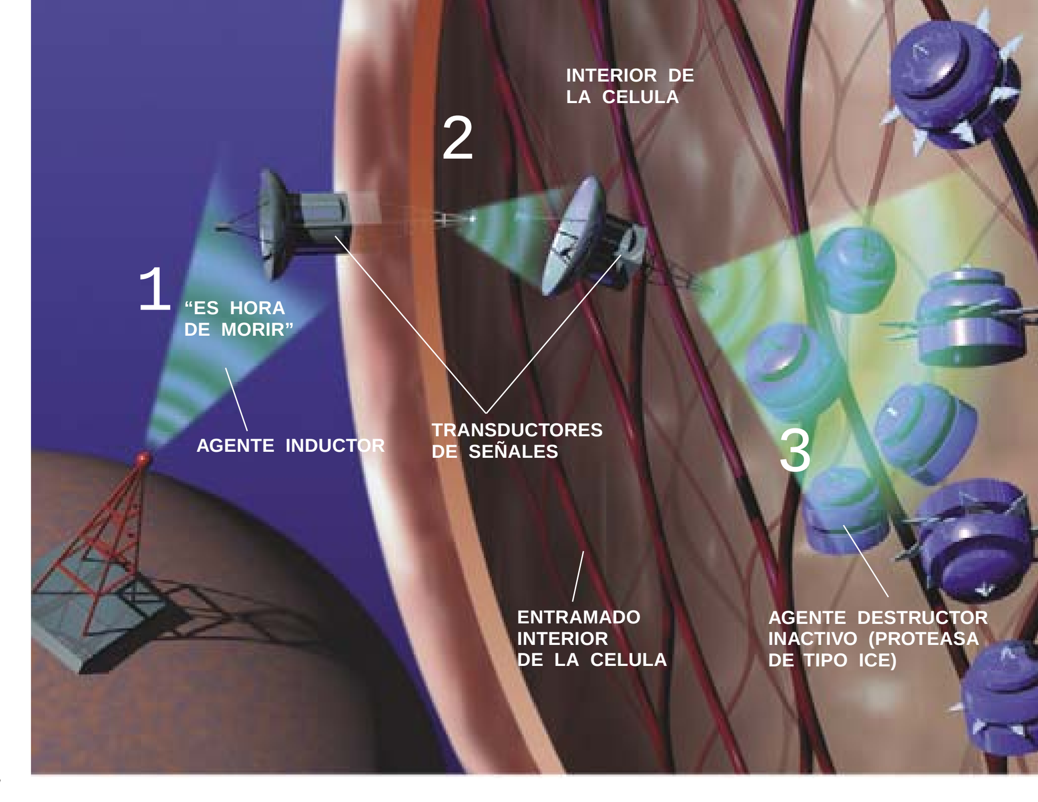
Las células *T* circulantes se tornan activas, esto es, proliferan y producen proteínas que promueven la inflamación, cuando sus receptores se traban con antígenos foráneos. Esta actividad es importante mientras persista el agente infeccioso; ahora bien, una vez desaparecida la infección, las células deben morir. Si tal no ocurriera, se acumularían y originarían una inflamación crónica (con su correspondiente hinchazón y fiebre) y, posiblemente, un estado de autoinmunidad.

Se conocen dos formas de inducir la apoptosis de las células innecesarias. Uno de los mecanismos implica la pérdida de factores de supervivencia; en este caso, la desaparición de interleucina 2, un factor de las células *T*, cuando se ha eliminado el agente infeccioso. El segundo mecanismo depende de una molécula Fas, que recientemente ha suscitado notable interés.

Las células *T* latentes producen pequeñas cantidades de proteína Fas, que se sitúa en la membrana celular. Uno de los extremos de la proteína se proyecta hacia el exterior de la célula y el otro hacia dentro, pudiendo así transmitir señales al interior celular. Cuando las células *T* encuentran un antígeno y se activan, fabrican más Fas, que en un comienzo no interviene. Sintetizan también transitoriamente otra molécula de superficie: el ligando de Fas. A los pocos días, Fas empieza a actuar. Entonces, el ligando de Fas presente en las células activadas se une al Fas que hay en la misma célula o en otra célula *T* activada, en el sitio donde se ha desencadenado la infección. Esa unión es la señal para que las células portadoras de Fas sufran apoptosis. Por tanto, las células *T* activas tienen unos pocos días para llevar a cabo su tarea (erradicar la infección), muriéndose después.

Hemos dicho ya que la sensibilidad de los linfocitos *T* y otras células a diferentes inductores de la

4. INICIO DEL SUICIDIO CELULAR, en una recreación artística. El proceso comienza cuando la célula recibe una señal externa (*1*) o interna y esa señal se transmite, a través de una serie de intermediarios o transductores de señales (2), a los agentes de la destrucción. Estos agentes, que pertenecen a una familia de proteínas denominadas proteasas de tipo ICE, se activan en respuesta a la señal (*3*). Las proteasas dañan a las células de muchas maneras posibles, atacando su entramado estructural (*4*) o activando enzimas que disgregan la cromatina nuclear (*5*).



apoptosis puede depender del estado de las células en cada momento. Cuando se irradia con rayos X, las células *T* latentes mueren en seguida, pero no así las células *T* activas. Una unión fuerte entre un receptor de timocito y proteínas del timo provoca la muerte, pero la unión de los antígenos con las células *T* maduras circulantes provoca su activación. Más aún: algunos tipos celulares son de por sí más proclives a la apoptosis que otros. ¿A qué se deben tales diferencias?

Sospechamos que la evolución se las ha arreglado para que las células irreemplazables, como las neuronas y las células del músculo esquelético, opongan mayor resistencia, ya que la pérdida de esas células acarrearía consecuencias nefastas para el organismo. Por contra, las células fácilmente sustituibles, como las sanguíneas, parecen más propensas a morir ante la menor provocación.

Se percibe con creciente nitidez que la sensibilidad está modulada fundamentalmente por la proteína Bcl-2 y otras similares, como las Bax y Bad. Unas moléculas bloquean la apoptosis, otras la promueven. La proporción entre aquéllas y éstas coadyuva a determinar la rapidez con que se va a producir la apoptosis. Se desconoce, sin embargo, el mecanismo de interacción entre las moléculas implicadas y la maquinaria letal.

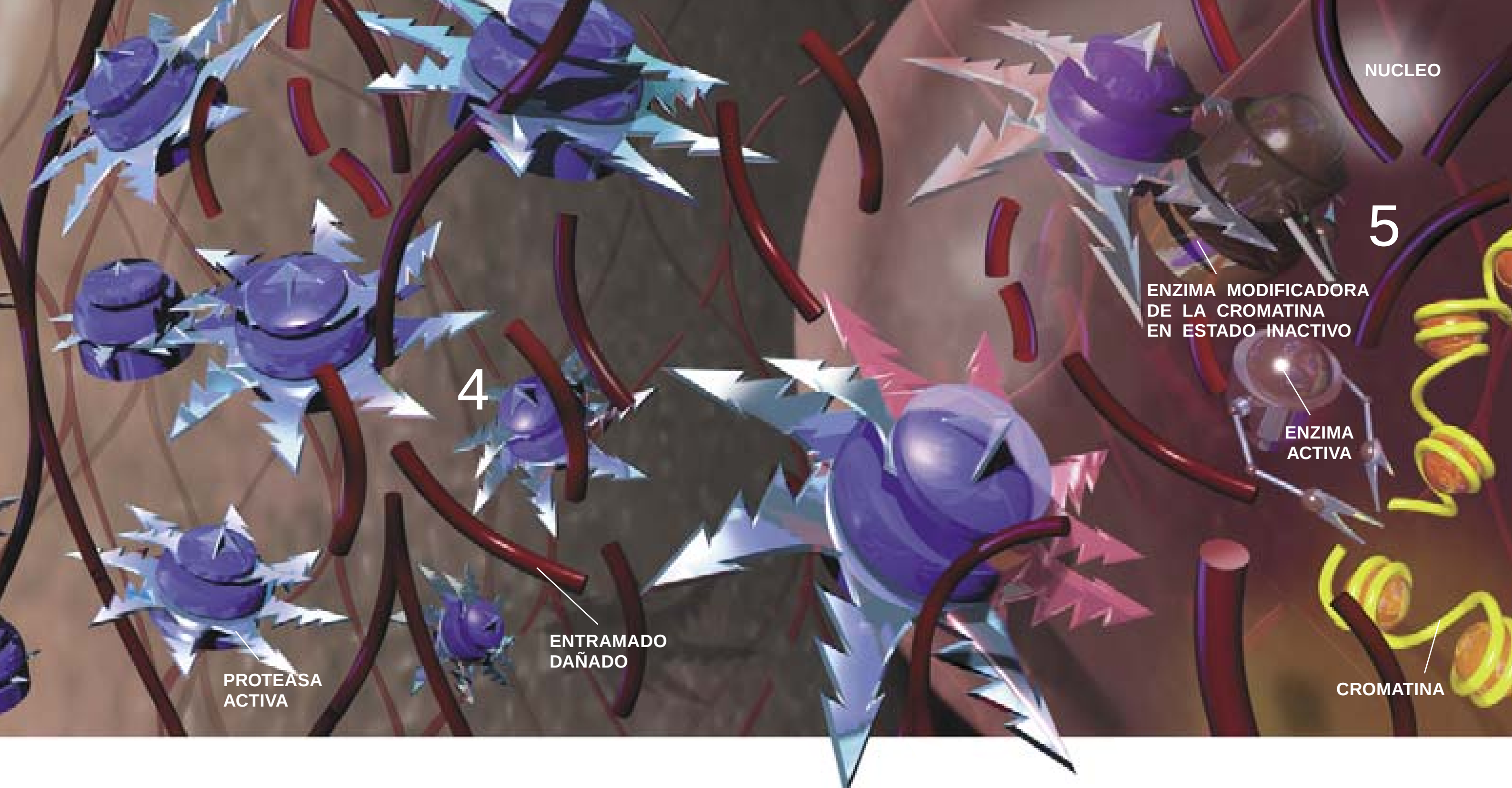
De la misma manera que la apoptosis es esencial para la supervivencia de un organismo, su desregulación parece estar detrás de muchas patologías, como las de etiología vírica.

Una vez dentro de las células, los virus intentan subvertir la maquinaria de síntesis de proteínas y ponerla a su servicio, para que sólo fabrique las proteínas necesarias en la producción de más virus. Para desgracia del virus, el mero acto de detener la síntesis proteica de su hospedador basta para inducir el suicidio en muchos tipos celulares. Si la célula hospedadora muere, se disgrega el virus con ella. Por eso, ciertos virus han desarrollado estrategias para inhibir la apoptosis de las células que infectan.

El virus de Epstein-Barr, agente de mononucleosis y vinculado con linfomas en humanos, recurre a un mecanismo que se ha observado también en otros virus. En efecto, produce sustancias que se parecen a Bcl-2, inhibidor de la apoptosis. Puede fabricar también moléculas que hacen que la célula hospedadora incremente su propia síntesis de Bcl-2. Los papilomavirus, una de las principales causas del cáncer cervical, inactivan o degradan la proteína p53, inductora de la apoptosis. Y los virus vacunales, similares a los utilizados como vacuna de la viruela, elaboran una proteína que impide a las proteasas de tipo ICE llevar a cabo el programa de apoptosis, lo que sugiere que algunos virus humanos podrían hacer lo mismo. De ahí que la búsqueda de terapias antivíricas se empeñe en hallar formas de bloquear la actividad de las moléculas antiapoptósicas preparadas por los virus.

Afortunadamente para los humanos y otros animales, el sistema inmunitario posee sus propias estrategias para contrarrestar esas artimañas víricas. Una de las principales consiste en erradicar las células infectadas, utilizando para ello una subserie de linfocitos *T* denominados citotóxicos, o células *T* asesinas. Tras unirse a las células diana, las células asesinas las bombardean con dos tipos de proteínas que, juntas, asestan un golpe mortal. Una de las proteínas (perforina) se inserta en la membrana de la célula infectada. Allí, forma un estructura parecida a un poro, que facilita la entrada de granzimas [*véase* "Células asesinas", por John Ding-E Young y Zanvil A. Cohn, en *Investigación y Ciencia*, marzo de 1988]. Estas enzimas pueden activar las proteasas de tipo ICE, induciendo así la apoptosis. Pero si este intento exterminador falla, los iones de calcio que atraviesan los nuevos poros pueden colaborar con las granzimas, produciendo una muerte necrótica.

Ahora bien, la capacidad que tienen las células *T* de inducir apoptosis a diestro y siniestro, no sólo en las células infectadas, puede perjudicar a las células sanas que residen cerca de los tejidos infectados. Semejante daño indiscriminado ocurre porque muchas células del cuerpo portan en sus membranas la proteína Fas, en especial cuando se infectan ellas mismas o sus vecinas. Si las células asesinas llegan hasta las células infectadas, el ligando de Fas que sobresale de la superficie de las células *T* puede acoplarse con la proteína Fas presente en las células enfermas, poniendo en marcha la maquinaria apoptósica en las células infectadas. Esta actividad es útil y aumenta la eficacia de otras tácticas inmunitarias para combatir las infecciones. Pero el ligando de Fas presente en las células *T* puede acoplarse con la proteína Fas que hay en las células sanas vecinas e instar también su suicidio. Se ha sugerido



que ese efecto indiscriminado pudiera ser la explicación del daño grave que los virus de la hepatitis infligen en el hígado, aunque infecten a muy pocas células hepáticas.

La inducción apoptósica de las células sanas parece contribuir también al hundimiento inmunitario que atormenta a los enfermos de sida. En la gente que contrae el virus de inmunodeficiencia humana (VIH), agente del sida, las células *T* coadyuvantes mueren. Cuando esos linfocitos *T* desaparecen, las células *T* citotóxicas mueren también, ya que éstas necesitan las señales de crecimiento de las células coadyuvantes para impedir la apoptosis. Cuando cae el número de células *T*, disminuye a su vez la capacidad del cuerpo para luchar contra las enfermedades, especialmente las infecciones víricas y parasitarias. Sabemos que son muchas más las células coadyuvantes que sucumben que las que son infectadas con el VIH. Resulta también evidente que muchas de las células mueren probablemente por apoptosis. Pero se desconoce el elemento que impulsa a esa autodestrucción.

Una respuesta plausible estaría en el exceso de proteína Fas. Recuérdese que, en condiciones de normalidad, las células *T* sólo fabrican proteína Fas funcional si llevan activas unos días y se encuentran ya listas para morir. Pero las células coadyuvantes de los sidosos pueden acarrear en sus membranas grandes cantidades de proteína Fas funcional, antes incluso de que las células hayan dado con un antígeno. Cabe esperar que tal despliegue de proteínas Fas les haga sufrir apoptosis prematuramente, cada vez que encuentran el ligando de Fas en otras células (como en las células *T* ya activadas contra el VIH u otros microorganismos). Las células pueden poner en marcha también su propia muerte, sin recibir señales de células activadas, si encuentran el antígeno que sus receptores reconocen. Cuando se produce el reconocimiento antigénico, las células *T* fabrican ligando de Fas. El ligando de estas células puede acoplarse con las moléculas Fas que ella misma porta y activar así el programa letal. Y lo que es peor, esas células *T* estimuladas antigénicamente, que portan Fas y su ligando, pueden expandir el proceso de muerte celular prematura, induciendo el suicidio celular a diestro y siniestro.

No podemos descartar que los radicales libres de oxígeno desencaden, por su parte, el suicidio de las células *T* exentas de virus. En los sidosos, las células inflamatorias de los nódulos linfoides infectados producen tales sustancias altamente reactivas, que atentan contra el ADN y las membranas celulares. Los radicales libres causarán necrosis si provocan un daño excesivo, pero pueden inducir apoptosis si el daño es más sutil. En apoyo de la tesis de los radicales libres, se ha observado que las moléculas capaces de neutralizar radicales libres previenen la apoptosis en células *T* obtenidas de pacientes con sida. (Hoy se están estudiando algunas terapias contra el sida basadas en la lucha contra la apoptosis.)

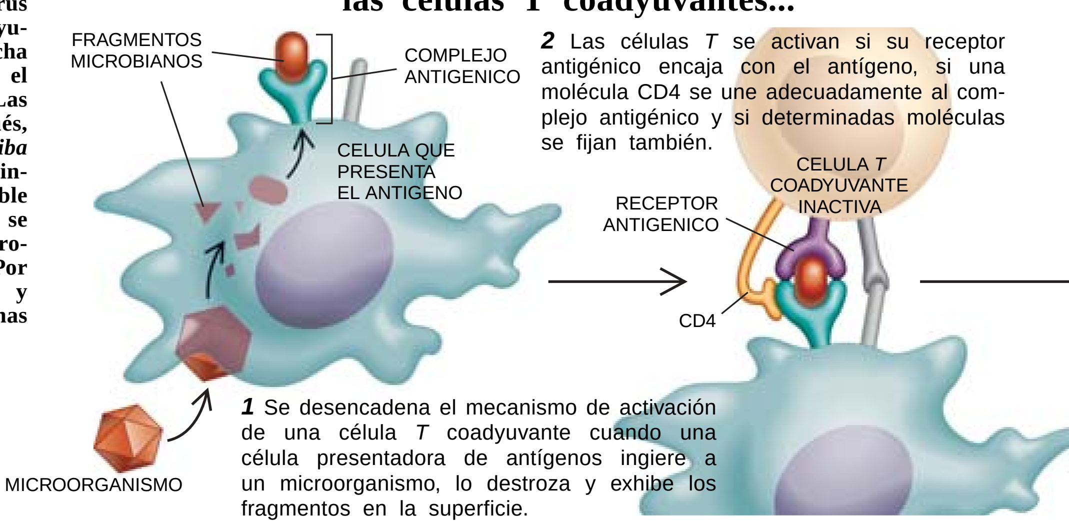
Aunque en los pacientes infectados con el VIH las células *T* coadyuvantes normales pueden verse inducidas al suicidio por otras células inmunitarias, en términos técnicos las células sanas no mueren por un proceso de autoinmunidad. Se dice que ocurre autoinmunidad cuando los receptores antigénicos de las células inmunitarias reconocen antígenos específicos de las células sanas y hacen que esas células que portan tales sustancias mueran. Pero existen también enfermedades de autoinmunidad en las que se da apoptosis.

Si el cuerpo elimina de oficio los linfocitos autorreactivos, ¿cómo puede presentarse la autoinmunidad? La verdad es que el cuerpo permite la circulación de algunos linfocitos dotados de una baja capacidad autorreactiva. Esas células suelen encerrar poco peligro, pero pueden volverse hiperactivas. Lo harán, por ejemplo, si esos linfocitos reconocen también algún antígeno foráneo (presente en algún microorganismo, o en la comida). Cuando tal acontece, proliferan y pueden llegar a atacar tejido sano con redoblado entusiasmo.

Las reacciones de autoinmunidad suelen ser autolimitadas. Desaparecen cuando los antígenos que las desencadenan se quitan de enmedio. En algunos casos, sin embargo, los linfocitos autorreactivos sobreviven más de lo que debieran y continúan induciendo apoptosis en las células normales. Por lo que se ha observado en animales

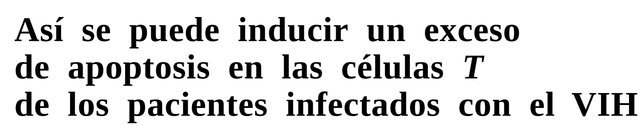
5. LAS CELULAS *T* de los sidosos sufren apoptosis prematura, aunque no estén enfermas. Cuando un virus invade un tejido, las células *T* coadyuvantes proliferan y ponen en marcha una respuesta inmunitaria contra el intruso (*arriba a la izquierda*). Las células *T* mueren varios días después, una vez concluido el trabajo (*arriba a la derecha*). En los pacientes infectados con VIH, virus responsable del sida, muchas células *T* sanas se suicidan antes de que puedan proliferar y combatir la infección. Por qué lo hacen no está muy claro y aquí se muestra una de las muchas posibilidades (*abajo*).

Así se activan en condiciones normales las células T coadyuvantes...

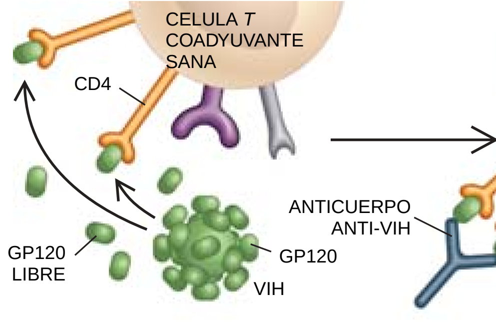


2 Las células *T* se activan si su receptor antigénico encaja con el antígeno, si una molécula CD4 se une adecuadamente al complejo antigénico y si determinadas moléculas se fijan también.

1 Se desencadena el mecanismo de activación de una célula *T* coadyuvante cuando una célula presentadora de antígenos ingiere a un microorganismo, lo destroza y exhibe los fragmentos en la superficie.



Así se puede inducir un exceso de apoptosis en las células *T* de los pacientes infectados con el VIH



3 La proteína Fas puede inducir la muerte inmediatamente si encuentra a una célula *T* activada que porte el ligando de Fas (*no se muestra aquí*). Pero la célula puede morir sin necesidad de ese contacto; basta con que reconozca a un antígeno y empiece ella misma a producir ligando de Fas.

1 La liberación de la proteína gp120 puede provocar un suicidio desmesurado de células *T* coadyuvantes en los sidosos. Ese polipéptido se fija en las moléculas CD4.

2 La unión hace que anticuerpos anti-VIH se fijen a dos CD4. Esa trabazón conmina a la célula al suicidio, quizá porque la induce a presentar prematuramente en su superficie proteína Fas funcional.

y humanos, parece que existe un exceso de supervivencia de células autorreactivas en al menos dos síndromes de autoinmunidad crónicos, el lupus sistémico eritematoso y la artritis reumatoide. En otras palabras, los linfocitos sufren muy poca apoptosis, y las células normales demasiada.

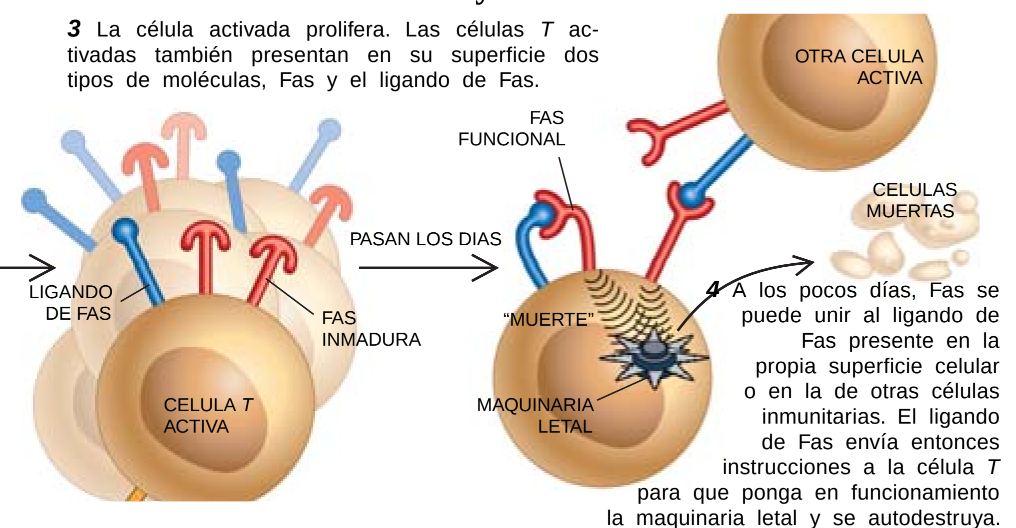
Se está investigando la posibilidad de que la larga vida de los linfocitos autorreactivos tenga que ver con su producción de moléculas que bloquean la unión entre el ligando de Fas (presente en las otras células) y la proteína Fas de su superficie, impidiendo así que el ligando envíe mensajes de muerte a los linfocitos. De acuerdo con otras hipótesis, los linfocitos evitarían la apoptosis porque producen poco Fas o mucho Bcl-2, el inhibidor del suicidio. En cualquier caso, un mayor conocimiento de cómo viven y mueren las células *T* debería conducirnos a la creación de estrategias que permitieran activar selectivamente el programa letal en los linfocitos específicos responsables de las enfermedades de autoinmunidad. Pensamos, por ejemplo, en poder enviar directamente una molécula activadora de Fas (quizás el propio ligando de Fas) a las articulaciones artríticas, induciendo así la autoaniquilación de las células inmunitarias hiperactivas.

Varios tipos de tejidos parecen utilizar el ligando de Fas para no ser víctimas de la autoinmunidad. Con el ligando de Fas en su superficie, células de testículo, ojo y posiblemente cerebro inducen una rápida apoptosis en cualquier célula *T* activada y portadora de Fas que se le cruce por el camino. Se espera poder aplicar este descubrimiento a los trasplantes de órganos. De momento, los únicos órganos y tejidos trasplantables son aquellos cuyos antígenos tipificadores de tejidos son compatibles con los de los tejidos de los receptores. La compatibilidad debe ser alta, condición para que el sistema inmunitario admita el trasplante. Pero si se lograse que los órganos y tejidos que se donan presentasen el ligando de Fas, podrían resistir los ataques inmunológicos del hospedador y ser adecuados por tanto para el trasplante.

En la autoinmunidad, las células inmunitarias no mueren cuando se supone que deberían hacerlo; en el cáncer son las células tumorales las que dejan de autosacrificarse. De hecho, la definición del cáncer cada vez se acerca más a la de una patología en que se produce una excesiva proliferación de células y una pérdida de capacidad autodestructiva [*véase* “Así se produce el cáncer”, por Robert A.

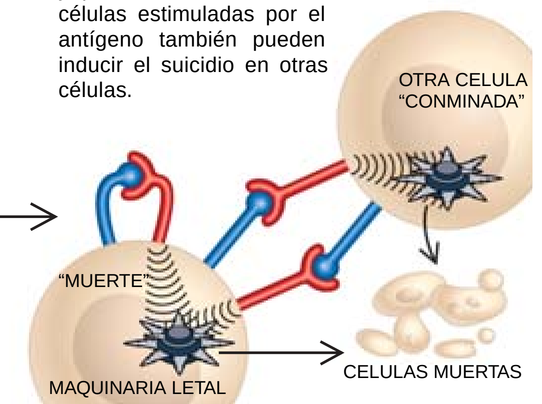


...y así mueren



3 La célula activada prolifera. Las células *T* activadas también presentan en su superficie dos tipos de moléculas, Fas y el ligando de Fas.

4 A los pocos días, Fas se puede unir al ligando de Fas presente en la propia superficie celular o en la de otras células inmunitarias. El ligando de Fas envía entonces instrucciones a la célula *T* para que ponga en funcionamiento la maquinaria letal y se autodestruya.



4 En las células "conminadas", la unión con el antígeno puede conducir a la muerte, porque el ligando de Fas se une entonces a la proteína Fas que se ha vuelto funcional prematuramente, y pone en marcha la orden de suicidio. Estas células estimuladas por el antígeno también pueden inducir el suicidio en otras células.

Weinberg, en *Investigación y Ciencia*, noviembre de 1996].

Se desarrolla el cáncer cuando una célula acumula mutaciones en varios de los genes que controlan el crecimiento y la supervivencia de las células. Si una mutación es irreparable, la célula afectada suele autodestruirse antes de volverse potencialmente peligrosa. Pero si la célula no muere, ella o sus descendientes pueden vivir lo suficiente como para acumular mutaciones que la lleven a dividirse sin control y originar metástasis, situación en que se desprenden del tumor original y establecen masas en puntos alejados del mismo.

En muchos tumores, el daño genético parece que impide que se induzca la apoptosis, ya que sus células han inactivado el gen que cifra la proteína p53. Esta proteína, recordemos, conduce a la activación de la maquinaria apoptósica de la célula cuando el ADN sufre daños. En más de la mitad de todos los tumores sólidos, incluidos los de pulmón, colon y mama, falta la proteína p53 o no es funcional.

Las células que alcanzan el estado canceroso podrían eliminarse por otros inductores apoptósicos. La tendencia de las células normales a suicidarse cuando les faltan sus factores de crecimiento normales o el contacto físico con sus vecinas constituye, a buen seguro, un mecanismo de defensa contra la metástasis; la rápida activación de la apoptosis en las células tumorales que abandonan su tejido originario erradica presumiblemente a muchas células metastásicas antes de que tengan alguna probabilidad de desarrollarse. Pero las células cancerosas se las arreglan a veces para volverse insensibles a los efectos apoptósicos de la falta de factores de crecimiento y la pérdida de los contactos célula-célula.

Otras proteínas relacionadas con la apoptosis se han visto comprometidas también en los estados malignos. En varios tipos de cánceres, nos referimos a determinados linfomas, se impide la muerte celular mediante una síntesis desmesurada de Bcl-2, la proteína inhibidora del suicidio. Y hay razones para sospechar que algunos tumores se oponen a que Fas envíe señales a la maquinaria letal, o producen ligando de Fas para evitar la apoptosis mediada por el sistema inmunitario.

Por extraño que parezca, ciertas células normales fabrican niveles sustanciosos de Bcl-2. Esta proteína parece proteger a las células cuya pérdida sería devastadora para el cuerpo, pero ese escudo tiene un precio. Si las células en cuestión se tornan cancerosas, engendran tumores más agresivos. Protegidas por Bcl-2, tienen una probabilidad menor de morir que otras células tumorales. En consecuencia, pueden ser más propensas a desarrollar metástasis en tejidos que no suministran los factores de supervivencia sintetizados por sus tejidos de origen.

Consideremos los melanocitos, células productoras de melanina. Este pigmento oscurece a otras células de la piel y previene de los efectos causados por la absorción de dosis letales de luz solar. Si los melanocitos muriesen fácilmente, correrían peligro las otras células. Por ello, los melanocitos fabrican grandes cantidades de Bcl-2. Sin embargo, cuando los propios melanocitos resultan genéticamente dañados no son tan propensos a suicidarse como las demás células de la piel, pero sí lo son, cuando se vuelven malignos, a formar tumores agresivos que se propagan con celeridad.

Los estudios sobre apoptosis han empezado también a aclarar la raíz de la resistencia que muchos tumores oponen a los efectos letales de las radiaciones y la quimioterapia. Creíase, tiempo atrás, que esas terapias causaban la destrucción del foco tumoral, provocando la muerte necrótica de las células malignas. Hoy sabemos que la muerte de esas células suele resultar de la apoptosis, frecuentemente por la activación de p53. Las células que carecen de p53 o que producen niveles elevados de la proteína inhibidora Bcl-2, pueden, por tanto, volverse resistentes a los efectos de los tratamientos anticancerosos.

Se están investigando las posibilidades de las terapias genéticas para vencer la resistencia a la apoptosis. En los trabajos correspondientes se introduce un gen *p53* normal en los cánceres que lo presentan dañado, con el fin de restablecer la síntesis de proteína p53 normal. También se han abordado las formas de impedir que los genes *Bcl2* hiperactivos produzcan proteína Bcl-2. Otros enfoques se han propuesto como meta impedir que las células reciban los factores de crecimiento específicos que promueven su supervivencia.

En contraste con el cáncer, donde ocurre muy poca apoptosis, la muerte celular que acompaña a las cardiopatías isquémicas y los accidentes cerebrovasculares causados por el bloqueo de uno de los vasos sanguíneos que

alimenta un segmento del músculo cardíaco o el cerebro se debe, en buena medida, al suicidio celular. En el corazón, el bloqueo diezma a las células que dependían totalmente de los vasos sanguíneos obstruidos. Esas células mueren por necrosis, en parte, porque son drásticamente privadas del oxígeno y la glucosa que necesitan para mantenerse y, en parte también, porque los iones de calcio, que en condiciones normales se bombean fuera de la célula, penetran a raudales y alcanzan niveles tóxicos. Pero aquí no se acaba la destrucción.

A los pocos días, las células que rodean la zona necrótica, y que inicialmente sobreviven porque siguen recibiendo alimentos procedentes de otros vasos sanguíneos, pueden también morir. Muchas fallecen por necrosis, alcanzadas por los radicales libres que se liberan cuando las células inflamatorias inundan la zona muerta para eliminar el tejido necrótico. Pero otras muchas células, que han sufrido daños menos graves, se suicidan. Si el paciente es tratado y se restablece su flujo sanguíneo, se eleva el número de células que pueden morir por necrosis o apoptosis: la reperfusión multiplica la producción de radicales libres.

Algo similar acontece en los accidentes cerebrovasculares. Las células más afectadas mueren por necrosis. Después, a los pocos días, la inflamación y los agentes químicos que se liberan de las células muertas (en particular el neurotransmisor glutamato) provocan más necrosis y apoptosis en las células vecinas. Las células que desaparecen lo hacen para siempre, ya que ni las células del músculo cardíaco ni las neuronas se dividen en el cuerpo adulto. El conocimiento de los factores que provocan la muerte hística inherente a las cardiopatías, accidentes cerebrovasculares y reperfusión, ha favorecido el desarrollo de nuevos tratamientos. En ese contexto, podría restringirse la muerte celular mediante fármacos bloqueantes de la producción de radicales libres o mediante drogas inhibidoras de las proteasas de tipo ICE.

Habrá que atribuir a la apoptosis el motivo de la muerte celular que se registra en enfermedades marcadas por la pérdida progresiva de neuronas cerebrales, como las enfermedades de Alzheimer, Parkinson, Huntington y la esclerosis lateral amiotrófica (enfermedad de Lou Gehrig). Se desconoce la causa exacta de esa apoptosis. Se han propuesto varios agentes; entre ellos, los radicales libres, niveles insuficientes de factores de crecimiento nervioso y niveles excesivos de neurotransmisores. Parece verosímil que una combinación de esos factores pudiera ser el responsable último de la autodestrucción gradual de muchas células. Estudios con animales indican que una administración prolongada de factores de crecimiento nervioso podría actuar de protección contra la apoptosis en esas condiciones. La pérdida del control normal del mecanismo de la apoptosis pudiera hallarse detrás de la retinitis pigmentosa (una de las causas de la ceguera) y la osteoporosis.

Nos encontramos todavía en las primeras fases de la investigación sobre la muerte celular, lo que significa que también están en sus etapas iniciales los esfuerzos empeñados en combatir las enfermedades mediante la intervención en el propio proceso autodestructor. En ello andan numerosos laboratorios farmacéuticos, diseñando nuevos fármacos y comprobando la influencia sobre la supervivencia celular de otros ya existentes. El conocimiento cada vez mayor de los procesos apoptósicos estimulará sin duda las líneas de investigación incoadas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

APOPTOSIS: A BASIC BIOLOGICAL PHENOMENON WITH WIDE-RANGING IMPLICATIONS IN TISSUE KINETICS. J. F. R. Kerr, A. H. Wyllie y A. R. Currie en *British Journal of Cancer*, vol. 26, págs. 239-257; 1972.

CELL DEATH MECHANISMS AND THE IMMUNE SYSTEM. Pierre Golstein, David M. Ojcius y John D.-E Young en *Immunological Reviews*, vol. 121, págs. 29-65; junio, 1991.

APOPTOSIS AND PROGRAMMED CELL DEATH IN IMMUNITY. J. John Cohen, Richard C. Duke, Valerie A. Fadok y Karen S. Sellins en *Annual Review of Immunology*, volumen 10, págs. 267-293; 1992.

THE FAS DEATH FACTOR. Shigekazu Nagata y Pierre Golstein en *Science*, vol. 267, págs. 1449-1456; 10 de marzo, 1995.

REGULATORS OF CELL DEATH. Stanley J. Korsmeyer en *Trends in Genetics*. vol. 11, n.º 3, págs 101-105; marzo, 1995.

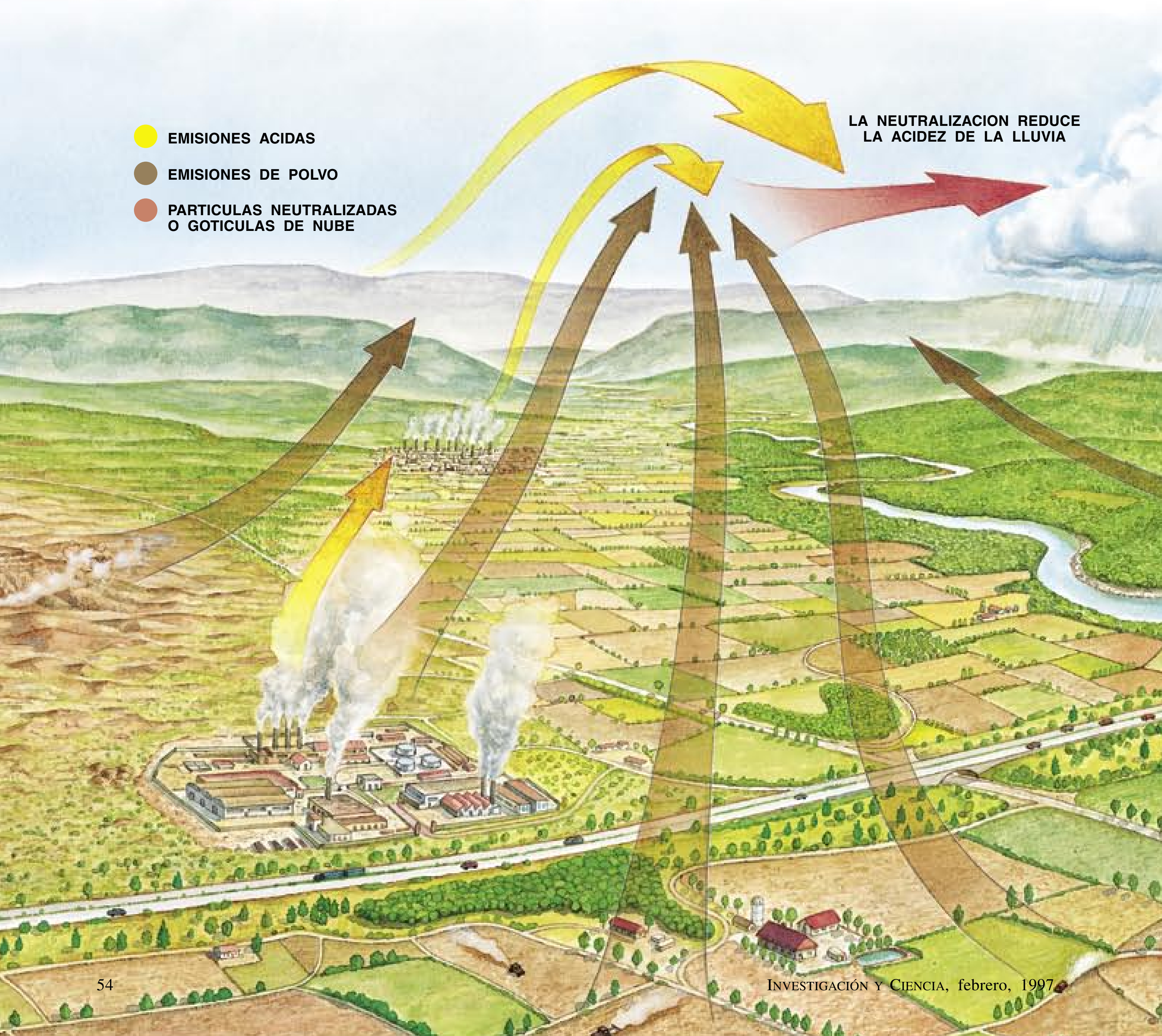
PROTEASE ACTIVATION DURING APOPTOSIS: DEAD BY A THOUSAND CUTS? Seamus J. Martin y Douglas R. Green en *Cell*, vol. 82, n.º 3, págs. 349-352; 11 de agosto, 1995.

Polvo atmosférico y lluvia ácida

Las emisiones de contaminantes ácidos hacia la atmósfera han decrecido de forma espectacular. ¿Por qué, entonces, la lluvia ácida sigue constituyendo un problema? El polvo atmosférico puede encerrar parte de la respuesta

Lars O. Hedin y Gene E. Likens

A lo largo de los últimos decenios, la ciencia se ha venido ocupando de la lluvia ácida y su incidencia en el ambiente. Conforme quedaron patentes las consecuencias desastrosas de los contaminantes ácidos, los gobiernos de Norteamérica y Europa se aprestaron a legislar sobre las emisiones de tales compuestos. En los países de la Unión Europea entraron en vigor diversas leyes que regulan las emisiones de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno; la Ley del Aire Limpio impuso normas similares en los Estados Unidos. Los responsables de la política ambiental esperaban que esas reducciones regeneraran los bosques, lagos y ríos de muchas regiones. En diversos aspectos, la cuestión parecía resuelta.



Pero el problema de la lluvia ácida no ha desaparecido. ¿Por qué sigue siendo ácida la lluvia que cae sobre ciertas partes de Europa y Norteamérica, pese a un control más riguroso de la contaminación? ¿Por qué algunos ecosistemas naturales —en particular los bosques— muestran niveles de daño, infligido por lluvia ácida, superiores a los que habían previsto los expertos?

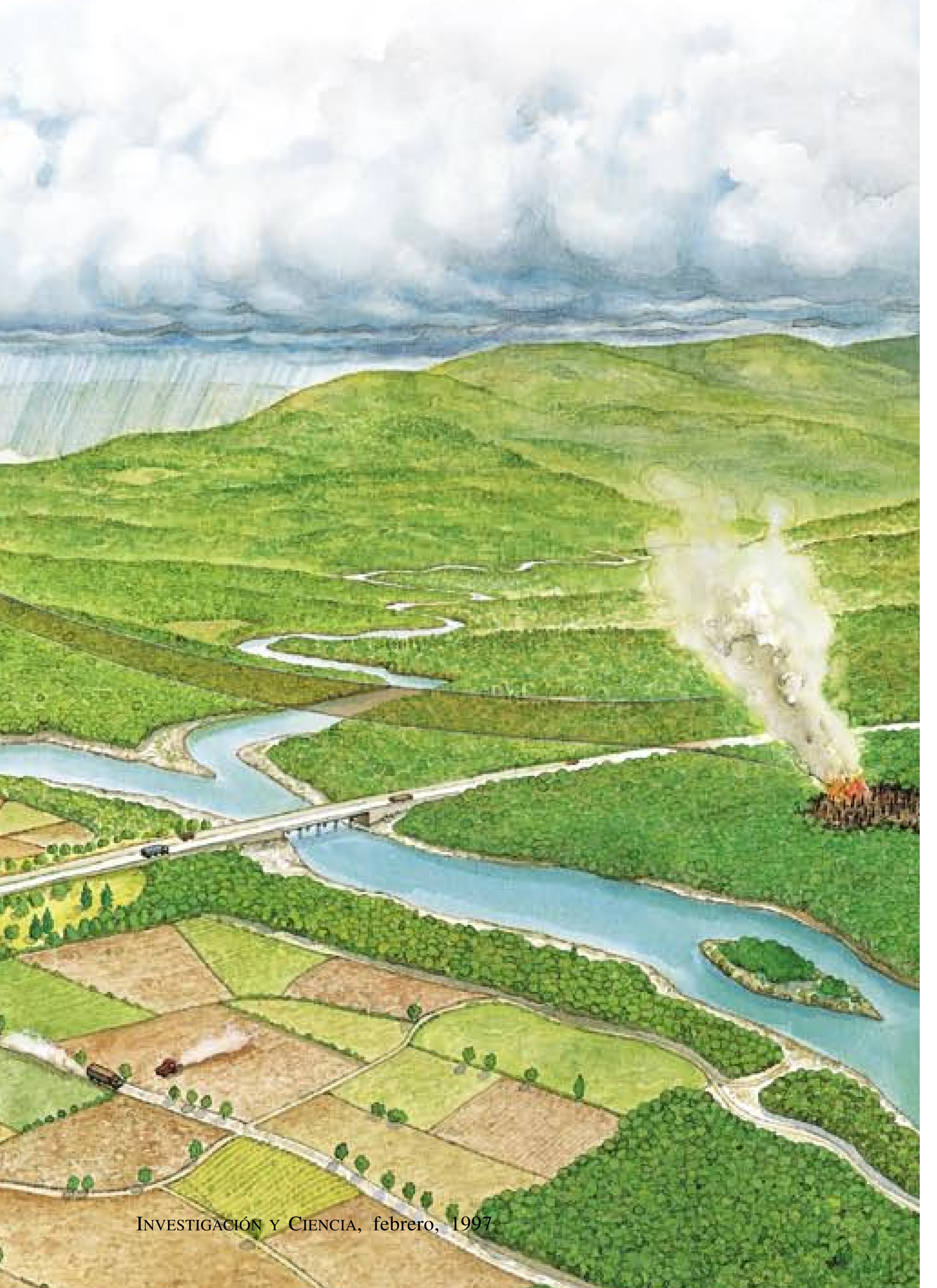
Según sugieren los descubrimientos recientes, la lluvia ácida sería un fenómeno mucho más complicado de lo que se suponía. Los resultados a que han llegado diversos estudios apuntan al papel, inesperado aunque crítico para la atmósfera, de determinadas bases, especies químicas que contrarrestan los efectos de la lluvia ácida neutralizando los contaminantes ácidos. Nosotros mismos hemos comprobado que la atención prestada a los compuestos ácidos de la atmósfera ha terminado por eclipsar un fenómeno preocupante, el de la disminución de las emisiones de bases. Todo indica que hay múltiples factores que reducen la concentración de bases en la atmósfera y, en el proceso, están agravando los efectos ecológicos de la lluvia ácida. No deja de resultar paradójico el que, entre tales factores, deban mencionarse algunas medidas acordadas por los gobiernos para mejorar la calidad del aire.

Los ácidos y las bases se miden por la escala de *p*H: las soluciones con un *p*H inferior a 7 son ácidas; básicas, las que tienen un *p*H mayor que 7, y son neutras las de *p*H igual a 7. Entre los ácidos comunes en cualquier vivienda recordaremos el vinagre, el zumo de naranja y la cerveza; son bases el amoniaco, la levadura y las tabletas antiácido. La mayoría de las bases de la atmósfera acostumbran encontrarse en las partículas suspendidas, en lo que genéricamente se conoce por polvo atmosférico. Estas partículas de polvo son ricas en carbonato cálcico y magnésico, minerales que actúan como bases cuando se disuelven en agua.

Las partículas de polvo atmosférico proceden de fuentes dispares. La combustión de carburantes fósiles, las actividades industriales (por ejemplo, la fabricación de cemento), la minería y el tratamiento de metales originan partículas que contienen bases. Los solares en construcción, las labores agrícolas y el tráfico en carreteras sin asfaltar también contribuyen. Los incendios forestales y la erosión causada por el viento que sopla sobre suelos áridos con poca vegetación, aunque se consideran fuentes naturales, están vinculadas también con la acción del hombre.

Un antiácido natural

En el aire, las partículas de polvo pueden neutralizar la lluvia ácida de manera semejante a como los antiácidos contrarrestan el exceso de ácido en un estómago perturbado. En cierto sentido, cuando un ácido y una base se combinan, se anulan entre sí dando lugar a una substancia más neutra. La neutralización se produce en la atmósfera cuando las partículas de polvo se disuelven en las gotículas de agua ácida que forman la nube o se combinan directamente con el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno u otros gases ácidos.



1. EL POLVO ATMOSFERICO (*flechas marrones*) encierra bases, especies químicas que neutralizan los contaminantes ácidos del aire (*flechas amarillas*) causantes de la lluvia ácida. Las emisiones industriales, la labranza y otras faenas agrícolas, así como el tráfico en carreteras sin asfaltar, contribuyen al polvo atmosférico. Las fuentes naturales incluyen los incendios forestales y la erosión eólica. Los contaminantes ácidos provienen principalmente de la combustión de carburantes fósiles en instalaciones industriales, automóviles y viviendas. Un beneficio adicional de las partículas de polvo es que suministran nutrientes a los bosques; desgraciadamente, el polvo puede originar problemas de salud y ambientales.

LARS O. HEDIN y GENE E. LIKENS han trabajado juntos durante más de un decenio investigando la incidencia de la lluvia ácida en bosques y ecosistemas acuáticos. Hedin enseña biogeoquímica terrestre en la sección de ecología y sistemática de la Universidad de Cornell. Amén de trabajar en cationes básicos, Hedin estudia los ciclos de nutrientes en bosques templados y tropicales que no han sufrido contaminación. Likens dirige el Instituto de Estudios de Ecosistemas de Millbrook. Tiene en su haber numerosas publicaciones sobre la lluvia ácida y la contaminación antropogénica.

Estas reacciones generan también cationes básicos, designación que se aplica a los átomos, dotados de carga positiva, de calcio, magnesio y elementos similares que aparecen cuando las bases minerales se disuelven en agua.

Además de reducir la acidez de la precipitación, los cationes básicos atmosféricos neutralizan la lluvia ácida una vez llegan al suelo, si bien el mecanismo químico es un poco diferente del que actúa en la atmósfera. Las pequeñas partículas de arcilla y humus del suelo llevan cargas negativas. (El humus es materia orgánica descompuesta.) En razón de esa negatividad, atraen a los cationes positivamente cargados, como el calcio y el magnesio. Esa es la razón por la que los suelos contienen una provisión natural de cationes básicos unidos a las partículas húmicas y arcillosas. Cuando la lluvia ácida penetra en el suelo, los cationes básicos ceden su lugar a los hidrogeniones, dotados de carga positiva, que se encuentran en los ácidos, los cuales se enlazan más fuertemente a las partículas del suelo. Puesto que tales partículas secuestran a los hidrogeniones, se mantiene baja la acidez del agua que penetra a través del suelo. En algunos suelos, el proceso se complica más: la lluvia ácida desencadena la disolución de iones tóxicos de aluminio que también desplazan a los cationes básicos.

Mientras el suelo disponga de una provisión abundante de cationes básicos, este sistema amortiguador, conocido por intercambio catiónico, protegerá a los bosques de los efectos dañinos de la lluvia ácida. Pero las reservas naturales de cationes básicos se pueden agotar si los suelos que son naturalmente pobres en bases quedan expuestos a decenios enteros de lluvia ácida. Tal ha ocurrido en ciertas regiones de Europa y Norteamérica, donde los hidrogeniones y los iones de aluminio han desplazado a una gran parte de los cationes básicos disponibles en los suelos, permitiendo el crecimiento de la concentración de aluminio y dejando el suelo altamente ácido. Además, los suelos, convertidos en ácidos, no pueden ya proteger de la lluvia ácida a los ecosistemas situados corriente abajo: las aguas que se filtran de esos bosques transportan ácidos y aluminio a los arroyos, lagos y ríos.

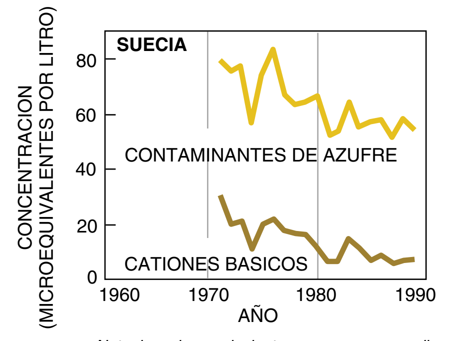
Las partículas de polvo pueden desempeñar otro importante papel. El calcio, el magnesio, el sodio y el potasio, elementos que pueden encontrarse en el polvo mineral, son nutrientes esenciales para la mayoría de las plantas. La lluvia ácida no sólo desaloja a esos elementos de las partículas de arcilla y humus, de las que las plantas recaban buena parte de sus nutrientes, sino que también los arrastra consigo a los ríos y arroyos, mermando la provisión mineral del ecosistema.

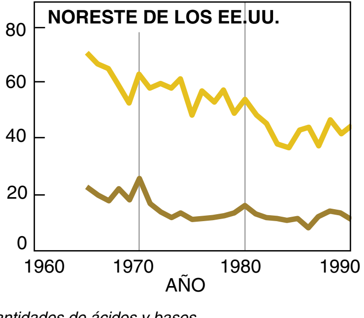
Con la excepción de los trabajos iniciales, en los años cincuenta, de Hans Egnér, de la Universidad Agrícola de Uppsala, y Eville Gorham, del laboratorio de la Asociación Biológica de Aguas Dulces de Inglaterra, la ciencia no ha prestado la debida atención a la idea de que la atmósfera constituya una fuente importante de los cationes básicos que hallamos en el suelo. Creíase que la lenta disolución de los minerales y las rocas de las regiones más profundas del suelo reponía los cationes básicos mediante el proceso natural de abrasión química.

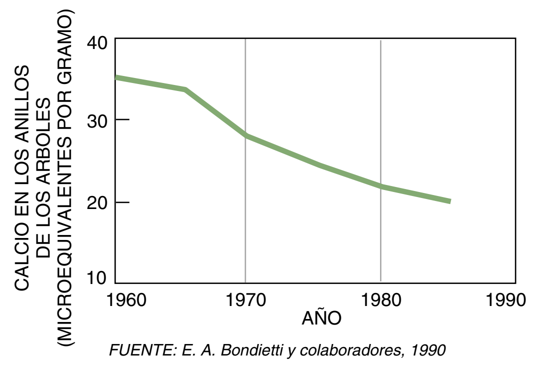
Pero descubrimientos recientes, entre ellos los obtenidos en nuestro propio trabajo, han forzado la revisión de la explicación aceptada sobre la forma en que las bases penetran en los suelos y sobre la dependencia de los bosques respecto de las aportaciones atmosféricas de minerales y nutrientes. En algunos bosques, la atmósfera parece ser realmente la principal fuente de cationes básicos. De los nuevos resultados se extrae la conclusión de que muchos bosques podrían ser más sensibles a los cambios operados en la química atmosférica de lo que se acostumbraba aceptar.

Menos polvo, más daños

Los esfuerzos empeñados en la reducción de las emisiones de contaminantes ácidos cosecharon unos éxitos iniciales alentadores: los niveles de azufre atmosférico, por ejemplo, han caído espectacularmente a lo largo de los 30 últimos años en gran parte de Europa y región oriental de Norteamérica. Nosotros nos propusimos sopesar si tales reducciones en los compuestos de azufre beneficiaban o no al medio. En ese contexto, nos preocupaba que los responsables de la política ambiental y los científicos pudieran estar subestimando







Nota: los microequivalentes se usan para medir cantidades de ácidos y bases

FUENTE: E. A. Bondietti y colaboradores, 1990

2. LA DISMINUCION PARALELA de los contaminantes ácidos de azufre y los cationes básicos que los neutralizan anulan gran parte del beneficio que se esperaba de la reducción de emisiones de contaminantes ácidos. Los estudios de los autores en Suecia y los EE.UU. suministran la prueba de esas tendencias. Además, otros estudios han mostrado que los niveles del catión básico calcio han decrecido en los árboles de un bosque de Nueva Hampshire a lo largo de los últimos decenios; tales disminuciones de nutrientes esenciales debilitan todavía más los bosques.

el papel de las bases atmosféricas. Considerando la importancia de las especies químicas básicas tanto para el crecimiento de los bosques como para la prevención de la lluvia ácida, decidimos investigar si los niveles de polvo atmosférico han cambiado, a lo largo del tiempo, en respuesta a las emisiones más bajas impuestas por la nueva legislación.

Se dictaron normas para limitar las emisiones de polvo porque, se sabía desde hacía tiempo, la inhalación de partículas microscópicas suspendidas en el aire acarrea múltiples problemas de salud, amén de reducir la visibilidad y originar un sinfín de trastornos ambientales. Los gobiernos de Norteamérica y Europa han venido elaborando a lo largo de los últimos 20 años normas de calidad del aire en punto a partículas suspendidas; tales normas diferían de las que regulaban la contaminación ácida. (El polvo atmosférico procedente de otras fuentes parece haber disminuido también. Gary J. Stensland y Donald F. Gatz, de la Inspección de Aguas del estado de Illinois, han hallado que las emisiones de partículas que contienen bases han descendido con la disminución del tráfico por carreteras sin asfaltar.)

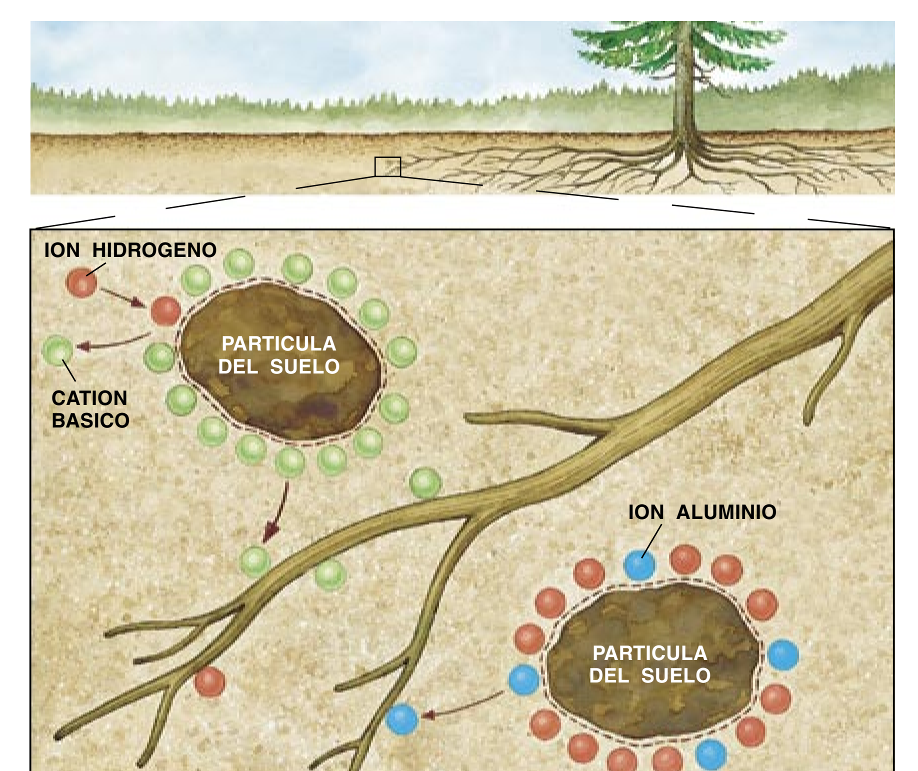
En colaboración con expertos europeos, empezamos por evaluar las series de química de la precipitación, lo más antiguas posible que hubiera referentes a la parte oriental de Norteamérica y a Europa occidental. Midiendo los cationes básicos disueltos en la nieve y el agua de lluvia, seguimos la pista del nivel de bases minerales en la atmósfera y registramos la proporción de esos cationes básicos que entra en los ecosistemas forestales. Obtuvimos unos resultados sorprendentes. Descubrimos que las bases atmosféricas habían disminuido a un ritmo inesperadamente vertiginoso en los últimos 30 años. La serie norteamericana más antigua, tomada en el Bosque Experimental Hubbard Brook de New Hampshire, mostraba una caída del 49 por ciento en cationes atmosféricos básicos desde el año 1965.

Al otro lado del Atlántico, la serie europea de alta calidad y máxima duración, de la estación sueca de Sjöängen, evidenciaba un decrecimiento del 74 por ciento en cationes básicos desde 1971. Nuestros análisis de otras series confirmaron, con pocas excepciones, que las bases atmosféricas habían descendido abruptamente en grandes zonas de Europa y Norteamérica.

Pero, ¿han sido esas bajas en bases atmosféricas lo suficientemente fuertes para contrarrestar —o incluso anular— los beneficios ambientales esperados de las reducciones en emisiones ácidas? Tal ha ocurrido, a tenor de nuestra investigación. En efecto, hallamos que la disminución de bases se superpone con frecuencia al descenso de azufre atmosférico, hasta el punto de que su ritmo anula una parte considerable del descenso de compuestos de azufre. Observamos, por ejemplo, que el descenso en cationes básicos anulaba entre 54 y 68 por ciento de las reducciones en azufre atmosférico en Suecia y hasta el 100 por ciento en determinadas zonas del oriente de Norteamérica. Estas tendencias significan que la disminución de las bases está manteniendo la sensibilidad de la atmósfera a los compuestos ácidos, pese a la reducción de las emisiones de los mismos. Cuando iniciamos el trabajo, no sospechábamos que la reducción de una forma de contaminantes —las partículas de polvo— sirviera para arruinar el éxito de las reducciones de otro contaminante, el dióxido de azufre.

Las numerosas fuentes de partículas de polvo y el carácter fragmentario de la información sobre las emisiones de partículas dificultan la tarea de determinar por qué se han producido esas notables reducciones en el contenido de bases atmosféricas. Sabemos que las modernas técnicas industriales, más limpias y desarrolladas de acuerdo con la normativa sobre la emisión de materia particulada, han constituido un factor importante.

No cabe la menor duda de que un mayor rendimiento de la combustión y una eliminación más eficaz de partículas en las chimeneas han permitido que se frenara la contaminación por partículas vinculada a la combustión de carburantes fósiles. Más difícil resulta cuantificar la contribución de fuentes de polvo difusas: tráfico, labores agrícolas y erosión eólica. Pese a ello, creemos que la disminución de las partículas de polvo refleja principalmente cambios en la conducta humana, más que variaciones naturales.



3. LOS CATIONES BASICOS (*verde*) que hay en el suelo proporcionan nutrientes para las plantas, que absorben las substancias químicas a través de sus raíces. Típicamente, los cationes básicos se unen a partículas de humus o arcilla (*izquierda*). Pero cuando la lluvia ácida cae sobre el suelo, los hidrogeniones (*rojo*) de la lluvia desplazan a los cationes básicos, arrastrados después con las aguas. Con el tiempo, los hidrogeniones, junto con los iones aluminio (*azul*) liberados del suelo como resultado de la lluvia ácida, pueden acumularse sobre las partículas (*derecha*). El hidrógeno y el aluminio no se limitan a desplazar a nutrientes esenciales. También alteran la bioquímica de la planta; el aluminio, en particular, puede ser tóxico.

Una fuente primaria de nutrientes

Se ha comprobado la caída de los niveles de calcio, magnesio y potasio en los suelos forestales del mundo. Leif Hallbäcken y Carl Olof Tamm, ambos de la Universidad Agrícola de Uppsala, hablan de pérdidas del 56 al 74 por ciento en los bosques noruegos de píceas a lo largo de los últimos 60 años. Otros informes indican igualmente preocupantes pérdidas de cationes básicos en Inglaterra, Alemania y los Estados Unidos. Estudios recientes de bosques enfermos muestran que semejante pérdida de cationes básicos puede ser un factor clave en el fenómeno de la degradación de los bosques. El grupo que encabeza Ernst-Detlef Schulze en la Universidad de Bayreuth sostiene que el empobrecimiento de los suelos en magnesio ha desempeñado un importante papel en la reducción de los bosques de coníferas en el Fichtelgebirge alemán. Aunque con menos respaldo, expertos del Laboratorio Nacional de Oak Ridge, dirigidos por Samuel B. MacLaughlin, argumentan que el retraso del crecimiento del abeto rojo en el sur de los montes Apalaches guarda correlación con la menor disponibilidad de calcio en los suelos. Conviene, sin embargo, señalar que ciertos experimentos a pequeña escala donde se abona el bosque con cationes básicos, particularmente calcio y magnesio, han corregido en parte los daños; es lo que ha acontencido en bosques de arce de Quebec, de pícea en Noruega y de abeto plateado en Alemania y Francia.

Hubo, pues, que preguntarse si ciertos suelos están sufriendo no sólo por su continua exposición a la lluvia ácida, sino también porque no reciben suficientes cationes básicos de la atmósfera. La investigación puede ahora identificar el origen de los cationes básicos y seguir sus movimientos a través de los ecosistemas forestales observando los isótopos naturales del estroncio (determinados evaluando el número de neutrones en el núcleo de un átomo de estroncio), elemento que sirve de trazador para el calcio. Los átomos de estroncio que provienen de los fondos rocosos y los que proceden de la atmósfera tienden a existir en forma de diferentes mezclas de isótopos. Esta técnica ha ilustrado que el polvo atmosférico es, de hecho, una fuente crítica de iones minerales en muchos ecosistemas forestales.

Además, en ciertas regiones donde los suelos se hallan expuestos al ataque de la lluvia ácida o son pobres en cationes básicos, la mayor parte del calcio parece provenir de la atmósfera, no del lecho rocoso. En ese sentido, hemos determinado que en bosques vírgenes de Chile la especie arbórea dominante, el haya meridional, se alimenta del calcio que se origina casi exclusivamente en la atmósfera.

De tales observaciones se infiere que muchos bosques dependen de manera muy estrecha de la atmósfera para el suministro de bases minerales; los descensos de cationes básicos atmosféricos han conducido, por tanto, a una reposición más lenta de bases y nutrientes críticos en los suelos forestales. Cierto es que siempre han variado los niveles naturales de polvo atmosférico, pero esas fluctuaciones se registran en intervalos de siglos o milenios. Los estudios llevados a cabo por el grupo de Paul A. Mayewski, de la Universidad de New Hampshire, sobre testigos de hielo de Groenlandia revelan que las cantidades de polvo y calcio atmosféricas se han visto intensamente afectadas por las variaciones del clima a lo largo de los últimos 20.000 años. En los climas más fríos y secos prevalecían los altos niveles de polvo y calcio, mientras que los períodos más húmedos y cálidos conocieron bajas concentraciones. El análisis de las tendencias modernas, desde el año 700 d.C. hasta el presente, sugiere que las cantidades actuales de polvo son bastante pequeñas en comparación con las condiciones de los últimos 20.000 años. Una notable excepción fue el Tazón de Polvo, la prolongada sequía de mitad del decenio de 1930 en el oeste de los Estados Unidos.



4. TEMPESTAD DE ARENA en el desierto de Sahara, que puede dispersar partículas de polvo alrededor del globo. Estudios en los bosques amazónicos han permitido descubrir polvo que se originó en el Sahara, a casi 5000 kilómetros de distancia.

Cuestiones pendientes

Conforme se ha ido revelando el interés de las bases de la atmósfera y, en fechas más recientes, la relación entre las emisiones de polvo atmosférico y nutrientes en el suelo, ha emergido un nuevo cuadro de la respuesta de los bosques a la contaminación atmosférica. El nuevo modelo sugiere que los efectos de la lluvia ácida son más complicados de lo que se suponía, y los daños causados por la contaminación, más serios de lo esperado. No podemos ya defender, por ejemplo, la conclusión, ampliamente citada, del Programa de Evaluación Nacional de la Precipitación Acida de 1990 (la más reciente valoración del problema de la lluvia ácida por el gobierno de los Estados Unidos), según la cual no había pruebas que vinculasen la lluvia ácida con la degradación de los bosques.

Entra dentro de lo posible que la persistencia de la lluvia ácida, sumada a las limitadas provisiones de cationes básicos, engendre unas condiciones ambientales a las cuales muchas especies de plantas, particularmente en ecosistemas frágiles, nunca hayan estado sometidas en el curso de su evolución. Se hace, pues muy difícil predecir cómo responderán a lo largo de los próximos decenios. Y los efectos pueden no quedar limitados a las plantas. El grupo dirigido por Jaap Graveland, de la Universidad de Groningen, ha observado que los grandes herrerillos de Holanda producen huevos más frágiles en los bosques afectados por la lluvia ácida y con bajas reservas de calcio en el suelo.

¿Qué hacer ante la lluvia ácida y el polvo atmosférico? Las sugerencias varían desde lo improbable hasta lo factible. A raíz de la publicación de cierto trabajo nuestro, un lector propuso salvar los bosques mediante una

campaña de globos de aire caliente para dejar caer partículas ricas en calcio desde el aire: una solución costosa y poco práctica. No parece viable incrementar la emisión de partículas, pues retrasarían en decenios el progreso en el control de la contaminación atmosférica. Más razonable sería reducir las emisiones de contaminantes ácidos a niveles que puedan quedar amortiguados con las cantidades naturales de compuestos básicos en la atmósfera; tal objetivo implicaría una reducción continuada del dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno, tal vez incluso mayor que las prescritas en las enmiendas de 1990 a la Ley del Aire Limpio de los EE.UU.

El dilema ecológico que plantea el polvo atmosférico nos acompañará probablemente durante algún tiempo: los cationes básicos tardan años en acumularse en los suelos; pasarían decenios o más antes de que los bosques recuperasen sus empobrecidas reservas de nutrientes, aun cuando siguiera descendiendo el nivel de contaminación atmosférica. Mientras tanto, los investigadores y los gobiernos deben desarrollar cuidadosas estrategias no sólo para vigilar la actual salud de los bosques, sino también para predecir su estabilidad en el siglo próximo y más allá. Las soluciones sencillas no siempre dan buen resultado en los ecosistemas complicados.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ECOLOGY AND DECLINE OF RED SPRUCE IN THE EASTERN UNITED STATES. Dirigido por C. Eagar y M. B. Adams. Springer Verlag, 1992.

POOR REPRODUCTION IN FOREST PASSERINES FROM DECLINE IN SNAIL ABUNDANCE OF ACIDIFIED SOILS. J. Graveland, R. van der Waal, J. H. van Balen y A. J. van Noordwijk en *Nature*, vol. 368, páginas 446-448; 31 de marzo, 1994.

STEEP DECLINES IN ATMOSPHERIC BASE CATIONS IN REGIONS OF EUROPE AND NORTH AMERICA. Lars O. Hedin, Lennart Granat, Gene E. Likens, T. Adri Buishand, James N. Galloway, Thomas J. Butler y Henning Rodhe en *Nature*, volumen 367, págs. 351-354; 27 de enero, 1994.

LONG-TERM EFFECTS OF ACID RAIN: RESPONSE AND RECOVERY OF A FOREST ECOSYSTEM. Gene E. Likens, Charles T. Driscoll y Donald C. Buso en *Science*, vol. 272, páginas 244-246; 12 de abril, 1996.

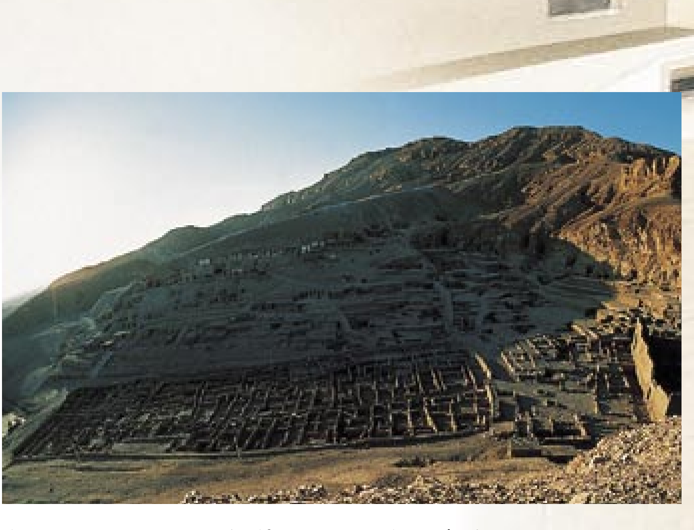
La vida diaria en el antiguo Egipto

Hace unos 3000 años vivían obreros con sus familias en la villa llamada hoy Deir el-Medina. Los testimonios dejados por aquella comunidad instruida nos ofrecen fascinantes descripciones de su actividad cotidiana

Andrea G. McDowell

La ciudad de Tebas, capital del Egipto meridional, llegó a ser uno de los grandes centros urbanos del mundo antiguo durante el período conocido como Imperio Nuevo (1539-1075 a.C.). Se construyeron entonces los imponentes conjuntos de templos de Karnak y Luxor, así como los dos monumentos que aún dominan la ribera oriental del Nilo en la moderna ciudad llamada actualmente Luxor. En el cercano Valle de los Reyes, adyacente a la orilla occidental del Nilo, hay unas 60 tumbas, entre ellas la del faraón Tut-an-khamon. Centenares de tumbas privadas, algunas de ellas con magnífica ornamentación pictórica, salpican también el paisaje a lo largo de los riscos que bordean la misma orilla occidental.

Aunque algunas de esas pinturas de los monumentos privados representan atractivos cuadros de la lujosa vida de





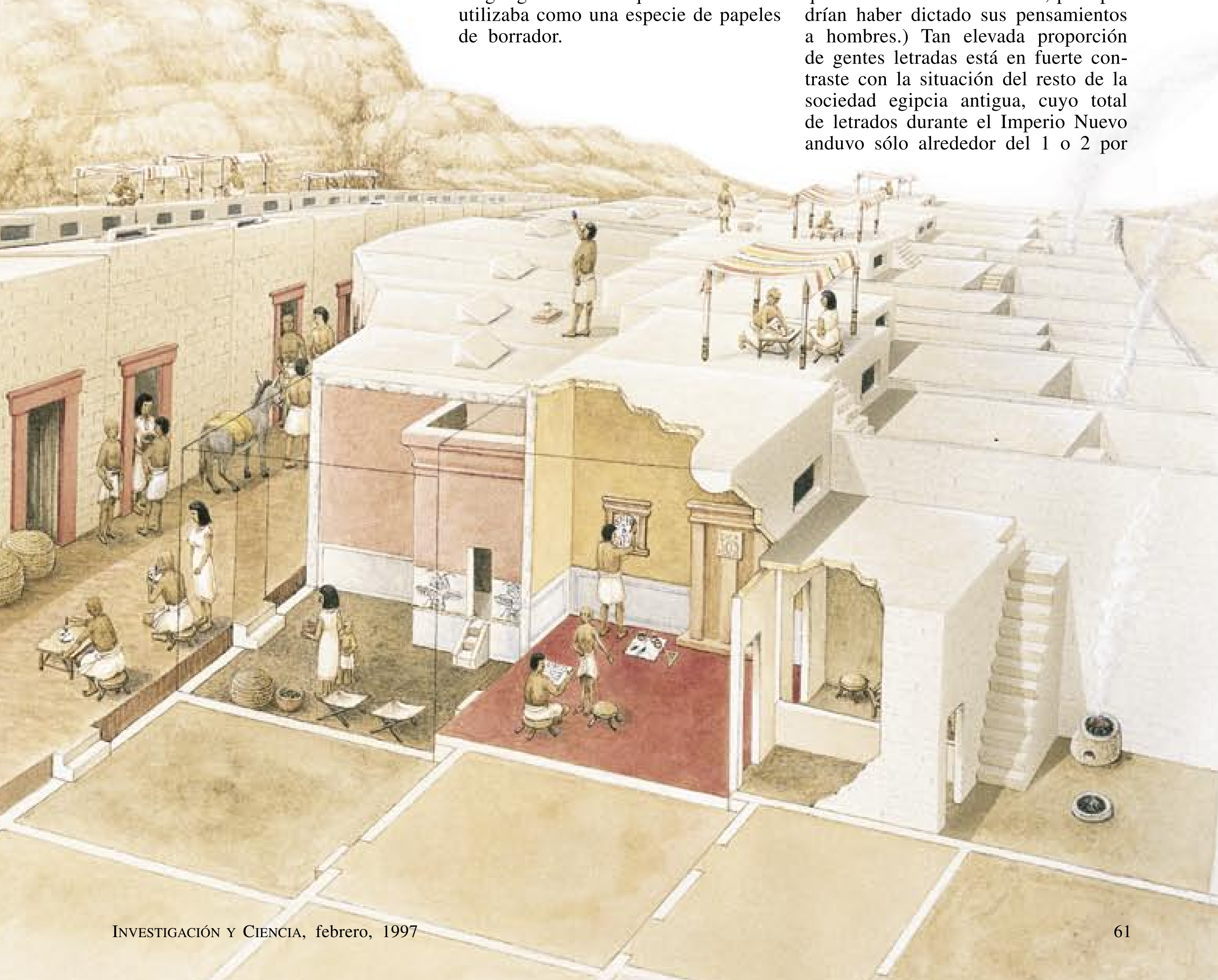
1. DEIR EL-MEDINA (*foto superior*) está situada cerca de las ruinas de la ciudad de Tebas. Deir el-Medina la habitaron los obreros y escribas que trabajaban en la construcción de las tumbas reales del Valle de los Reyes. Aquellos artesanos empleaban lajas de piedra caliza (llamadas, con término griego, *óstraka*) como barato material para escribir, y en ellas anotaban datos oficiales o privados, escribían cartas y poemas y trazaban dibujos. Se han encontrado miles de tales *óstraka* entre los restos admirablemente bien conservados de aquella villa, de la que se muestra aquí (*a la derecha*) una figuración del aspecto que podría haber tenido hace unos 3000 años.

los nobles, en conjunto, los templos y tumbas restantes nos dicen más cosas sobre la religión de aquellas gentes y sobre sus creencias relativas al más allá que acerca de su forma de vivir. Su vida diaria no está tan bien documentada porque, a diferencia de los monumentos de piedra que vemos hoy, la mayoría de sus casas, hechas de adobes secados al sol, sucumbieron a los desbordamientos del río, cuyas aguas se llevaron también todo el mobiliario y el material escrito que pudiese darnos noticia de cómo vivían los pocos letrados que hubiera en aquella época remota. Sin embargo, en lo que debió de ser el confín más occidental de la extensa ciudad antigua, los restos de una pequeña comunidad se libraron de la general desintegración. Hállanse estos restos en la población que lleva ahora el nombre de Deir el-Medina, donde habitaron otrora los obreros y artesanos que excavaron y decoraron las tumbas reales del Valle de los Reyes.

Lo seco y relativamente aislado del lugar ha mantenido en bastante buen estado el yacimiento: casas y templetes se alzan aún en pie hasta dos metros de altura en algunos sitios. Los arqueólogos que trabajaron allí durante la primera mitad de nuestro siglo encontraron entre las ruinas, además de tumbas intactas en las que había sarcófagos, mobiliario y vestimentas, gran cantidad de monumentos religiosos y de utensilios domésticos. Y por todo el yacimiento, pero especialmente en lo que debieron de ser los vertederos de basura de la ciudad, los investigadores recuperaron decenas de miles de documentos escritos, la mayoría de los cuales datan del período entre 1275 y 1075 a.C. Algunos textos están escritos en hojas de papiro, pero la mayoría lo están en trozos de arcilla o en pedazos de blanca y alisada piedra caliza —denominados en griego *óstraka*— que la comunidad utilizaba como una especie de papeles de borrador.

ANDREA G. McDOWELL inició su estudio de Deir el-Medina mientras preparaba su tesis de doctorado en historia antigua por la Universidad de Pennsylvania. Ha sido profesora de egiptología en la Johns Hopkins.

Estos escritos sí que nos informan sobre la vida de sus habitantes. Hállanse ahí actas de gobierno, poemas de amor y cartas de particulares en las que se describen enredos y peleas de familia, preocupaciones por la salud y litigios legales. También nos permiten asomarnos un poco al sistema educativo del antiguo Egipto, tema que ha ocupado parte de mi labor investigadora. La riqueza del yacimiento en textos sugiere que, durante algunos períodos de su historia, la mayoría de los hombres de la población sabían leer y escribir. (Imposible averiguar si también serían letradas muchas mujeres; ciertamente las hubo que se intercambiaron cartas, pero podrían haber dictado sus pensamientos a hombres.) Tan elevada proporción de gentes letradas está en fuerte contraste con la situación del resto de la sociedad egipcia antigua, cuyo total de letrados durante el Imperio Nuevo anduvo sólo alrededor del 1 o 2 por







2. RETRATOS de un cantero (*izquierda*) y de un escriba (*derecha*) en los que se ven dos estilos de dibujo hallados en *óstraka* de Deir el-Medina. En el apunte un tanto informal del cantero, con su cincel y su maceta, nótense la bulbosa nariz, la barba sin rasurar y la boca abierta, detalles sin duda exagerados para lograr un efecto cómico. El autorretrato del escriba Amenjotep adorando al dios Thoth se ajusta a los cánones formales del arte egipcio.

ciento de los habitantes. Los *óstraka* nos informan de cómo lograron alcanzar aquellos aldeanos tan notable nivel de instrucción.

Pero antes de examinar con más detenimiento el sistema educativo que funcionó en Deir el-Medina, un rápido vistazo a algunos de los recuperados *óstraka* nos ayudará a reconstruir la vida de la villa y el contexto en que se desarrolló tan extraordinario cultivo de las letras. El gran número de documentos administrativos nos indica que los egipcios fueron unos burócratas empedernidos, que llevaban minuciosa cuenta del instrumental y de las raciones que se daban a las cuadrillas de obreros, apuntaban los progresos de las obras y registraban casi todos los detalles susceptibles de cuantificación.

Las anotaciones particulares de los residentes ofrecen incluso mayor variedad. Muchas de ellas son de carácter práctico: resguardos de compraventas o actas de contiendas legales. Los textos más curiosos son quizá las cartas personales, que a quien las lee le introducen de lleno en aquel mundo del Egipto del Imperio Nuevo. En una de estas misivas, un padre, Pay, le dice a su hijo que tiene un ojo enfermo. (Las enfermedades oculares serían uno de los riesgos inherentes al trabajo de construir tumbas, a causa del polvo, la mala iluminación y las esquirlas de piedra que herían a los operarios.)

El dibujante Pay dice a su hijo el dibujante Pre[emjeb?]:

No me vuelvas la espalda; no me encuentro bien. No c[eses] de llorar por mí, pues estoy en la [oscuridad(?) desde que] mi señor Amón me [volvió] su espalda.

Podrías traerme un poco de miel para mis ojos, y también algo de ocre, que se me ha convertido en ladrillos otra vez, y auténtico tizne negro para los párpados. [¡Apresúrate!] ¡Procúralo! ¿No soy yo tu padre?



3. UTILES de la profesión: brochas de varios tamaños, un bote con pigmento rojo y trozos de minerales en bruto. Los escribas usaban estos instrumentos para pintar las figuras y los jeroglíficos con que se decoraban las tumbas reales.

Ahora me hallo en desgracia:
¡ando buscando mi vista y no
la encuentro!

No es de extrañar que Pay se lamentase: la ceguera habría incapacitado totalmente a un artista que dibujaba las figuras y los jeroglíficos en el interior de las tumbas. Descripciones de la mezcla de miel, ocre y hollín para los párpados solicitada por Pay aparecen en papiros especialmente dedicados a temas médicos, señal de que se trataba de un remedio común. Ciertamente la miel tiene propiedades antisépticas, y con el ocre, ingrediente de muchas otras recetas de la época, se enfriaban los párpados, lo cual se pensaba que reducía su inflamación. Como este tipo de enfermedad ocular aquejaba a muchos operarios, el tratamiento debía de ser muy conocido, y Pay se lo autoprescribía. También habría podido pedir Pay a su hijo que le obtuviese la receta de un médico.

Aproximadamente la mitad de los textos encontrados en Deir el-Medina son piezas religiosas o literarias. Se han hallado en el yacimiento copias de la mayoría de los "clásicos" de la antigua literatura egipcia; en algunos casos, esos *óstraka* constituyen la única muestra de una obra llegada hasta nosotros. Estos "clásicos" eran parte fundamental de la instrucción de un estudiante: miles de textos escolares son extractos de las obras maestras de la literatura del Imperio Medio (alrededor del 2000-1640 a.C.), compuestas en un lenguaje tan anticuado en comparación con el usual de aquellos estudiantes como lo es comparado con el de los nuestros el *Cantar de Mío Cid*. Por lo demás, muchos de los habitantes fueron también autores, componiendo textos didácticos, himnos y cartas. El escriba Amenajté escribió un poema en alabanza de la cosmopolita ciudad de Tebas, emplazada sobre ambas orillas del Nilo:

¿Qué se dicen a sí mismos
en sus corazones cada día
los que están lejos de Tebas?
Se pasan la jornada soñando [?]
con su nombre, [diciendo:]
"¡Fuera al menos su luz la
nuestra!"...
El pan que en ella se come es
más sabroso que los pasteles hechos con grosura de ganso.
Su [agua] es más dulce que la
miel: bébesela hasta la hartura.
¡Mirad, así es como se vive en
Tebas!
El cielo ha duplicado la [fresca]
brisa para ella.

Una lección de literatura egipcia

El *óstrakon* aquí representado contiene un extracto del poema "Sátira sobre los oficios", obra clásica de la literatura del Egipto del Imperio Medio. El poema describe diversas ocupaciones, tales como la de tejer, la de fabricar flechas y la de mensajero, que el autor consideraba inferiores a la de la honorable profesión de escriba. El estudiante que hizo esta copia no conocía muy bien el arcaico lenguaje del poema —escrito hacía más de 700 años— y mutiló el texto original. Al final de la lección, el estudiante escribió la fecha con tinta roja.

—A. G. McD.



Pasaje de la obra original
El correo se adentra por el desierto,
dejando sus bienes a sus hijos;
temeroso de los leones y de los asiáticos,
[sólo] se siente seguro de sí
cuando está en Egipto.
Al llegar a su casa por la noche,
la larga marcha le ha agotado del todo;
sea su casa de lona o de ladrillos,
su retorno no es nada alegre.

Traducido de la versión inglesa de Miriam Lichtheim, en *Ancient Egyptian Literature* I, (University of California Press, 1973)

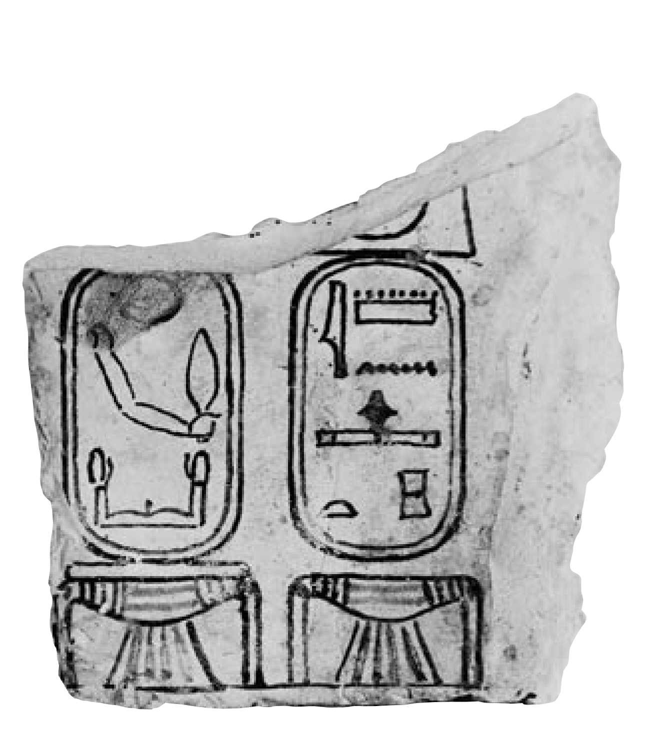
Copia del pasaje hecha por el estudiante
El correo se adentra por el desierto,
dejando sus bienes a sus hijos;
temiendo (a los) leones y a los asiáticos,
¿qué es ello cuando está en Egipto?
Cuando llega a casa agotado,
la jornada le ha quebrantado.
Mientras salga [de] su
lona [o] ladrillo,
nunca volverá alegre.
—Tercer mes de la estación invernal, día 1.º

Los habitantes de la villa tenían en alta estima el conocimiento de la literatura y las habilidades en las artes literarias, como lo indica un papiro hallado en los archivos de un escriba residente. En este extracto, el escritor rinde un inusual homenaje al saber; mientras otros documentos tienden a dar importancia sobre todo a la pericia caligráfica y a la familiaridad con la literatura clásica, esta descripción de la profesión de escriba insiste en la importancia de la autoría, la creación de textos originales y la fama que puede venir después de la muerte. Para concluir, el escritor apela a la gran aspiración de los egipcios a la inmortalidad:

En cuanto a los sabios escribas del tiempo que siguió al de los dioses —aquellos que predijeron las cosas futuras— sus nombres perduran para siempre, aunque ya se ausentaron una vez completadas sus vidas, y de sus parientes nadie se acuerda.

No se hicieron ellos para sí pirámides cubiertas de cobre ni funerarias lápidas de hierro. No pudieron dejar tras de sí herederos en forma de hijos [que] ensalzaran su nombre, pero hicieron que fuesen su herencia los escritos llenos de instrucciones que habían compuesto.

La excepcional proporción de individuos letrados que hubo entre los operarios de Deir el-Medina se debió, sin duda, a que muchos de ellos eran hábiles artesanos que, para sus trabajos





4. MUESTRA de los cartuchos del faraón Amenjotep I, dibujada con mano segura en una de las caras de este *óstrakon* (*izquierda*). Un discípulo giró el *óstrakon* e hizo una copia (*derecha)*, cambiando en el proceso la posición de algunos signos.

en las tumbas reales, necesitaban dominar lo escrito en jeroglíficos. En los comienzos de la historia de la villa, las tumbas de los faraones contuvieron sólo simples copias de las guías para el mundo de ultratumba, escritas en letra cursiva y adornadas con viñetas de figuras esquemáticas; pero hacia finales del s. XIV a.C. se empezó a ornamentar las tumbas con escenas detalladamente esculpidas y pintadas. Por el mismo tiempo aumentó mucho entre los habitantes la proporción de los que sabían leer y escribir, como lo prueba el creciente número de textos escritos a partir de ese período.

Los relieves pintados se introdujeron en el Valle de los Reyes durante el reinado del faraón Horemjeb (1319-1292 a.C.). Los más elaborados proyectos de Horemjeb y de los siguientes faraones requerían para su realización unos equipos de artistas que trazaran los dibujos iniciales, otros que los esculpieran y otros que completaran la tarea pintando los relieves. Y como de la ornamentación formaban parte numerosísimos textos jeroglíficos, aquellos artistas tenían que saber leerlos y escribirlos.

Quizá lo más sorprendente sea que, de los responsables del duro trabajo de excavar la tumba en la rocosa ladera de la montaña, por lo menos algunos sabían también leer, aunque para tan penoso cometido no les haría ninguna falta. A estos obreros puede que les motivase la ambición: el ser instruido y letrado encerraba en Egipto la clave para hacer una buena carrera, pues era lo que separaba a la clase artesanal de la de los labriegos, y el dominar tales artes les sería muy útil a los obreros cuando no encontraran trabajo entre los constructores de tumbas. Además, puede que el cultivo del saber sirviese también en la villa de poderoso estímulo que animase a los jóvenes a estudiar emulándose unos a otros.

Los egiptólogos podemos espigar numerosos detalles de los *óstraka* encontrados en Deir el-Medina, mas por desgracia aún es poco lo que sabemos en concreto sobre cómo aprendían los residentes a leer y a escribir. Los textos del Imperio Nuevo sólo incidentalmente se refieren a escuelas, indicando que existían y que ya eran un tanto crecidit os los niños que asistían a ellas. En este contexto, un



5. LOS HORNOS para cocer el pan estaban situados en las traseras de las casas de Deir el-Medina. En este dibujo pueden verse las palabras “soplando para avivar el fuego del horno” en el texto escrito a la izquierda.

breve relato describe las experiencias escolares de su joven héroe, hijo de madre soltera:

> Fue enviado a la escuela y aprendió a escribir muy bien. Practicó todas las artes de la guerra y venció a todos los camaradas de más edad que estaban en la escuela con él. Un día sus camaradas le dijeron: "¿De quién eres hijo? ¡Tú no tienes padre!" Y le insultaban y se mofaban de él: "¡Eh, mira que no tener padre!"

Pero todavía no se cuenta con prueba alguna de que en Deir el-Medina hubiese realmente escuela. No hay referencias textuales a ningún edificio que hiciese de tal, ni estructuras que parezcan guardar relación con las aulas, ni una concentración de restos de ejercicios escolares que indique que hubiese allí algún local destinado a la enseñanza. De hecho, no tenemos datos acerca de cómo los hijos de aquellos obreros empezarían a adquirir las técnicas de la lectura y la escritura.



6. EL DIBUJO HECHO POR UN ALUMNO en este *óstrakon* ha sido corregido —línea blanca— por su maestro. En Deir el-Medina, los jóvenes tenían tutores individuales que les enseñaban a leer y escribir y les educaban.

Algunos de los *óstraka* nos permiten hacernos una idea algo más completa de lo que podríamos llamar enseñanza secundaria. Muchos de los documentos hallados en Deir el-Medina son evidentemente ejercicios para estudiantes aventajados, y algunos están firmados con los nombres del discípulo y del maestro. Hay textos en los que aparece una fecha señalando el final de la lección del día; otros textos tienen varias de esas fechas, lo que al parecer indica que un estudiante utilizó un mismo *óstrakon* para varias lecciones.

De la diversidad de firmas que se ven en los *óstraka* se deduce que los padres o los abuelos solían supervisar la educación de sus hijos o nietos, aunque en ocasiones los padres —aun siendo ellos mismos letrados— confiarían sus hijos a alguien de superior rango para que les impartiese enseñanzas más especializadas. (Una firma quizá sea la de una joven estudiante, con lo que al menos una mujer habría recibido su instrucción de esta forma.) Discípulos los habría de todas las edades y lo serían no sólo los futuros dirigentes de la comunidad, sino también jóvenes que jamás subirían por encima de su rango de picapedreros. En cambio, parece lógico que los maestros procedieran de clases sociales más altas: los instructores mencionados en los *óstraka* serían principalmente escribas, dibujantes o capataces.

Los estudiantes tomaban sus lecciones alternándolas con sus trabajos en la tumba, según lo indican las fechas en los *óstraka*; a menudo los textos contienen múltiples fechas separadas por varios días; solía, pues, transcurrir un tiempo entre las lecciones en el que presumiblemente tanto el maestro como el discípulo irían al trabajo. No obstante, había suficiente tiempo para estudiar. Los obreros tenían muchos días libres, sobre todo a medida que la tumba iba estando a punto de acabarse, hacia el final del reinado de un faraón; durante las últimas fases de la construcción, puede que no tuvieran que trabajar más de un día de cada cuatro en el Valle de los Reyes.

El sistema educativo de Deir el-Medina fue diferente del de los otros pueblos y ciudades del resto de Egipto, muy en especial por lo que respecta a la enseñanza de la lectura y la escritura. Además, los materiales empleados para escribir y el tiempo disponible para aprender contrastan también mucho con las prácticas de cualquier otro sitio. Los ejercicios estudiantiles hallados en otros lugares se realizaron sobre papiros reutilizados —fáciles de aprovechar en los puestos oficiales— y parece que eran obra de jóvenes aprendices que se estaban preparando para ocupar cargos de gobierno; estos estudiantes proseguían sus estudios día tras día y se afanaban por llenar varias páginas de papiro en cada jornada.

En Deir el-Medina, los maestros podían enseñar a unos picapedreros, en los días libres de trabajo, a escribir sobre lajas de piedra caliza (el material que tenían más a mano), pero también introducían a sus discípulos en la lectura de los grandes clásicos de la literatura egipcia, con miras a transmitirles su sabiduría y a asegurarles mayores éxitos en sus carreras. Como le indicó un escriba del lugar a un joven alumno: "Aplica muy firmemente tu ánimo a escribir, que es profesión provechosa para quien la ejerce. Tu padre sabía de jeroglíficos y se le honró en las calles."

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

COMMODITY PRICES FROM THE RAMESSID PERIOD: AN ECONOMIC STUDY OF THE VILLAGE OF NECROPOLIS WORKMEN AT THEBES. Jac. J. Janssen. E. J. Brill, Leiden, 1975.

THE TOMB-BUILDERS OF THE PHARAOHS. Morris Bierbrier. British Museum Publications, Londres, 1982.

LETTERS FROM ANCIENT EGYPT. Traducción al inglés de Edward F. Wente. Dirigido por Edmund S. Meltzer. Scholar Press, 1990.

Origen de ibéricos, vascos y argelinos

El origen y las relaciones entre poblaciones se han fundado por lo común en datos arqueológicos, culturales, lingüísticos y otros factores externos. El estudio directo de los genes permite proceder sobre bases más fiables

Antonio Arnáiz Villena y Jorge Martínez Laso

Los pacientes sometidos al trasplante de un órgano temen una palabra fatídica: rechazo. Los médicos prefieren hablar de histocompatibilidad, si el órgano injertado es bien acogido, y de histoincompatibilidad, si el organismo destinatario no acepta el trasplante. Los genéticos van más allá y buscan los últimos responsables de la actividad inmunitaria que admite lo que el organismo considera propio y ataca cuanto reputa foráneo.

Esos últimos responsables son genes. En el cromosoma 6 del hombre se aloja cierto racimo de ellos, los genes del complejo principal de histocompatibilidad o HLA. Estos son, pues, los que determinan el rechazo o aceptación de un trasplante. Algunos confieren también susceptibilidad a enfermedades reumáticas y autoinmunitarias. Las proteínas determinadas por los genes de histocompatibilidad cumplen una función crucial: atrapar los antígenos microbianos y presentarlos a los linfocitos *T* para que comience una respuesta inmunitaria.

Pero el sistema HLA presenta, además, una peculiaridad interesante: su enorme variabilidad. Nada tiene, pues, de extraño que se haya acudido a él para singularizar poblaciones humanas. Tal variabilidad indica que hay alelos que se dan con notable frecuencia en una población y no en otras geográficamente alejadas. Los amerindios, por ejemplo, abundan en determinados genes HLA específicos (B*1522, B*3510, B*3514, B*3516. En esta secuencia, la letra mayúscula señala el *locus* génico; el asterisco se pone delante del nombre del alelo, y el número es el alelo correspondiente). Además, existen combinaciones de alelos que singularizan aún más las poblaciones. Esas combinaciones reciben el nombre de haplotipos. En ibéricos, sardos y norteafricanos, por ejemplo, abunda el haplotipo A30-B-18-DR3.

Antes de proseguir, conviene saber que existen dos clases de genes HLA, I y II. El sistema HLA de clase I comprende los genes A, B y C, entre otros. El sistema HLA de clase II consta de los genes DR, DQ y DP.

Con la técnica de la reacción en cadena de la polimerasa y otras propias de la genética molecular se ha comprobado que la variabilidad génica del sistema HLA es mucho mayor de lo que en un comienzo se había supuesto. El *locus* A del sistema HLA consta de 59 alelos; 126 contiene el *locus* B; 154, el DR, y 40 el *locus* DQ.

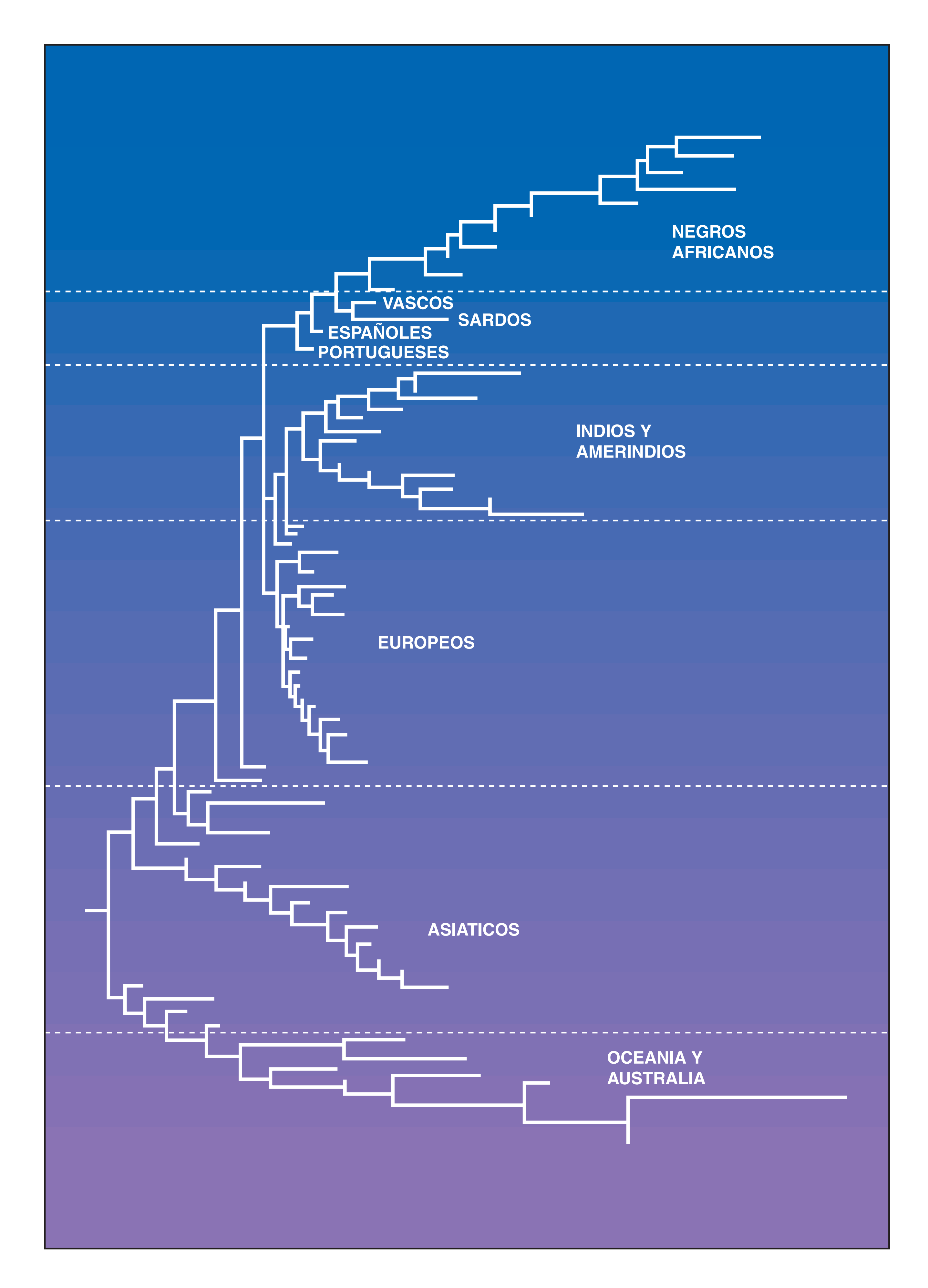
Algunas poblaciones conservan, en parte y a lo largo del tiempo, frecuencias de los alelos específicos del grupo fundador, así como combinaciones alélicas también específicas. Y ello acontece pese a la mezcla poblacional que siempre ha existido y que se ha incrementado exponencialmente en el último siglo gracias al mayor trasiego de personas posibilitado por el desarrollo de las comunicaciones. Con todo, no se ha llegado a una dilución absoluta de las frecuencias características del sistema HLA originarias; fenómeno que lógicamente se hace más patente en los grupos que se han mantenido aislados del exterior.

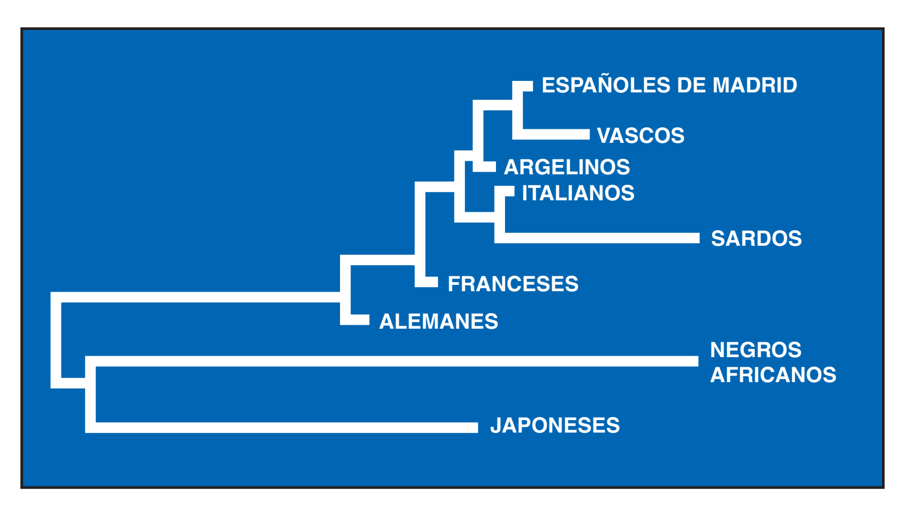
En el último Taller Mundial de Histocompatibilidad de Tokio, celebrado en 1991, se aprovechó la potencia del sistema HLA para comparar las relaciones filogenéticas de muchas poblaciones de los cinco continentes. En ese cotejo se calculan las distancias genéticas a partir de las diferencias de frecuencias de los genes A y B del sistema HLA. Las distancias genéticas que median entre una población y otra hallan su expresión gráfica en los árboles filogenéticos. En tales dendrogramas, las poblaciones más cercanas, en cuanto a frecuencias de genes HLA se refiere, ocupan ramas del árbol más próximas también.

El dendrograma global obtenido en dicho taller refleja la agrupación de las poblaciones por continentes y razas: Africa y negros; Europa y caucasoides o blancos, unidos a blancos norteamericanos y australianos; asiáticos, también juntos. Es decir, el estudio de las distancias genéticas deducidas a partir de los genes HLA nos ofrece una panorámica real de la distribución

1. RELACION entre las diferentes poblaciones mundiales según los genes de los antígenos leucocitarios humanos, HLA. Puede apreciarse que vascos, sardos e ibéricos se sitúan cerca de las poblaciones africanas. Los datos en que se fundan estos cladogramas están tomados del último taller internacional de HLA. En general, las relaciones más estrechas se observan entre las poblaciones más próximas geográfica y antropológicamente. Se han calculado las frecuencias de cada alelo en cada población; se han medido luego las distancias genéticas entre poblaciones en razón de las diferencias de frecuencias alélicas existentes entre cada una de ellas y, por último, se han representado las distancias genéticas en dendrogramas o árboles de emparentamiento, como el de la figura.

ANTONIO ARNAIZ VILLENA y JORGE MARTINEZ LASO han venido trabajando desde hace años en el campo de la histocompatibilidad. Arnáiz es catedrático de inmunología de la Universidad Complutense de Madrid y jefe de servicio de inmunología del Hospital 12 de Octubre, del que es adjunto Martínez Laso.


NEGROS
AFRICANOS
VASCOS
SARDOS
ESPAÑOLES
PORTUGUESES
INDIOS Y
AMERINDIOS
EUROPEOS
ASIATICOS
OCEANIA Y
AUSTRALIA



2. MAYOR PARENTESCO DE ESPAÑOLES de Madrid y vascos con los argelinos que con el resto de los europeos. Para crear este árbol se utilizaron unos marcadores HLA mucho más finos que los empleados en la figura anterior. Además de los antígenos A y B del sistema se emplearon genes DR y DQ, determinados por secuenciación de ADN indirecta.

geográfica actual de las poblaciones y razas. En ese mapa arbóreo, los amerindios están más cercanos a los mexicanos que a los asiáticos por la probable razón de que en México la población actual procede de un amplio mestizaje europeo. Curiosamente, sardos, vascos e ibéricos ocupan ramas más cercanas a los africanos (negroides), así como a sus descendientes y mestizos americanos.

Para obtener datos más precisos sobre la posición de las poblaciones ibéricas y vascas en los árboles de distancias genéticas fundadas en el sistema HLA era necesario estudiar las poblaciones del norte de Africa que, desde tiempos preneolíticos, son poblaciones blancas. Estos *hamitas* o *camitas*, tal es su nombre, podrían estar emparentados con las poblaciones existentes en el preneolítico de la península Ibérica. Uno de los grupos étnicos hamitas fueron los bereberes, que en los países del Magreb se mezclaron con árabes, procedentes de la península Arábiga durante los siglos VII y VIII de nuestra era.

En efecto, hacia el año 3000 a.C. el desierto del Sahara se parecía ya bastante al que hoy conocemos. Sin embargo, le habían precedido 5000 años de bruscos cambios climáticos que transformaron por completo la región relativamente húmeda y con zonas verdes, que antaño fue. Ello comportó emigraciones importantes de población. Los blancos del norte de Africa, los hamitas, se vieron probablemente forzados a trasladarse hacia tierras más benignas de la península Ibérica, Cerdeña y Canarias, archipiélago éste habitado por los guanches. No es descartable que, incluso antes de que ocurriesen los cambios climáticos en el Sahara, guanches, iberos y hamitas blancos paleonorteafricanos tuvieran lazos de estrecho parentesco.

Las antiguas poblaciones hamitas norteafricanas podrían estar hoy representadas por sus descendientes bereberes, que han permanecido aislados, no islamizados y con una cultura propia; podrían hallarse también mezclados, en Argel y otras ciudades norteafricanas, con los descendientes de los invasores musulmanes que llegaron allí antes que a España. La población actual de Argelia es en gran parte bereber, con el componente correspondiente de árabes llegados posteriormente y con mezcla de genes negros subsaharianos. Argel, la capital, es un importante centro inmigratorio, y en cuanto tal representa la población de todo el país, amén de contar con un componente caucasoide francés de sus tiempos coloniales.

Por lo que respecta a la península Ibérica, retrotraigámonos más atrás. Hacia el año 50.000 a.C. habría en la cornisa cántabra una pequeña población indígena de unos 5000 habitantes; a ésos pertenecerían los artistas de la cueva de Altamira. El núcleo ibérico principal, hace entre 10.000 y 22.000 años, tendría en común con norteafricanos elementos de cultura capsiense; a él se agregarían luego oleadas de invasores procedentes del Sahara, forzados por el cambio climático gradual que promovió su desertización en torno al 6000 a.C.

A lo largo del primer milenio antes de nuestra era, la población de la península Ibérica aproximadamente se dobló con las invasiones celtas del centro de Europa, que penetraron en sucesivas oleadas. La aportación poblacional y genética de fenicios, griegos, romanos y "bárbaros" fue probablemente muy pequeña. En el año 710 unos 30.000 invasores islámicos (una parte de ellos, bereberes recientemente islamizados) entraron en la península y terminaron por mezclarse con los cuatro millones, aproximadamente, que ya la ocupaban.

En el marco de ese cruce constante de poblaciones dispares, ¿qué quedó de los pobladores del norte peninsular? Apoyados en la arqueolingüística, Wilhelm von Humboldt y Luis Michelena postularon que los vascohablantes constituyen un residuo que se separó del grupo ibero inicial. En esa idea han abundado otros lingüistas que han asimilado el vascuence al ibero hablado en una extensa zona del norte peninsular, de Asturias a Cataluña, como Juan Román del Cerro, Gabriel Carretié y Jorge Alonso García. Para otros autores, el vascuence mostraría un origen caucásico. Pero, ¿qué dice la genética? No se disponía de datos hasta recientemente, cuando se han analizado las frecuencias de antígenos y genes HLA.

En esa labor, nosotros realizamos una triple incursión: entre los argelinos de Argel, los vascos y los españoles de Madrid.

Decidimos emprender el estudio de los genes HLA de argelinos de Argel por los métodos clásicos y por secuenciación del ADN. Elegimos, entre los donantes de sangre del Hospital Central del Ejército, una muestra poblacional de individuos sin mezcla europea en las tres generaciones anteriores. Determinamos los antígenos HLA de clase I (A, B y C) por serología convencional y los antígenos HLA de clase II por secuenciación del ADN de los genes DR y DQ.

Trabajando con marcadores genéticos, Jaime Bertranpetit, de la Universidad de Barcelona, había llegado a la conclusión de que los vascos eran una población europea muy antigua, probablemente ya establecida en tiempos preneolíticos. Por nuestra parte, habíamos obtenido también muestras de ADN y linfocitos de vascos, procedentes de voluntarios del Hospital Virgen de Aránzazu de San Sebastián. Los individuos fueron seleccionados en este caso entre los que tenían hasta ocho apellidos vascos. Por secuenciación del ADN y serología, se

determinaron los alelos HLA como en el caso de los argelinos.

Hicimos un tercer análisis con una muestra control de españoles procedentes de donantes de sangre, sin relación de parentesco y residentes en Madrid. La capital de España ha sido centro de inmigración de muchas regiones en el último siglo y puede considerarse, la "madrileña", una población representativa de los "españoles" en general, aunque para evitar connotaciones de otra índole distinta de la científica empleemos la expresión españoles de Madrid.

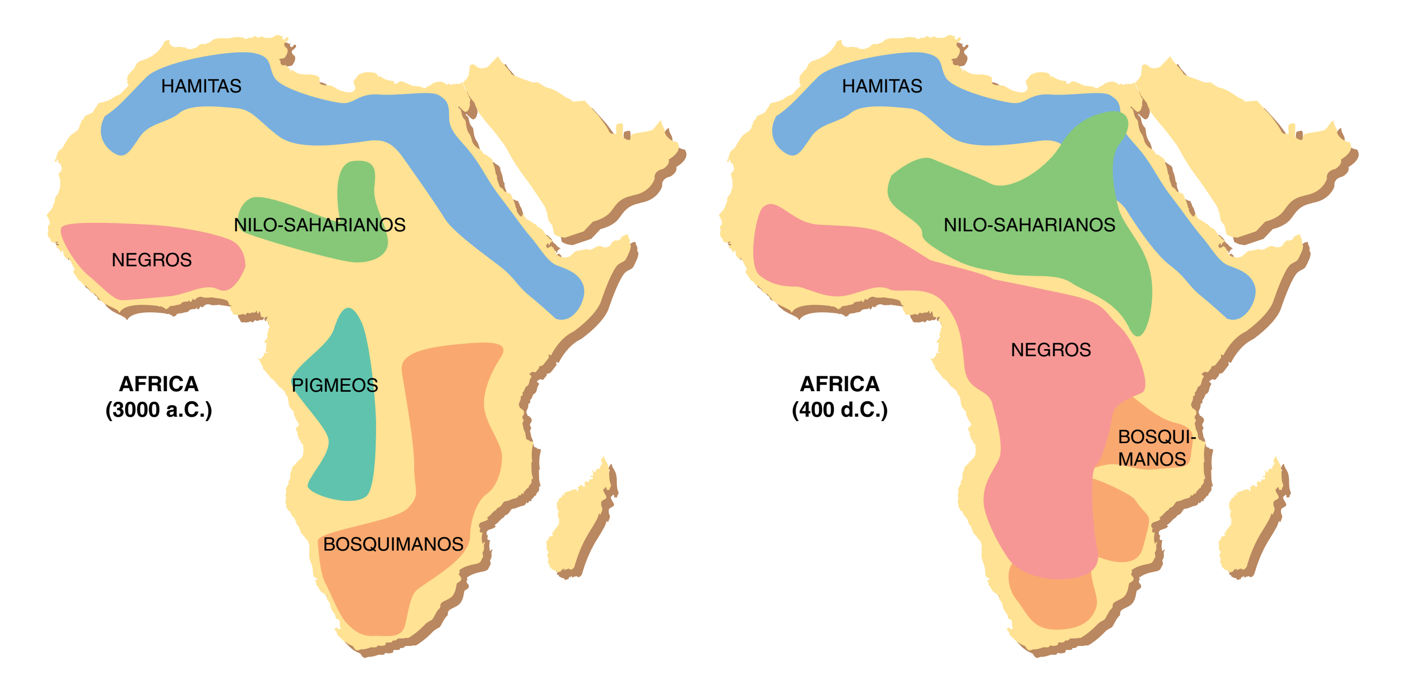
Una vez recabados los datos genéticos HLA de argelinos de Argel (entendidos también como argelinos en general), vascos y españoles de Madrid, calculamos las frecuencias de los alelos HLA y las distancias genéticas entre estas poblaciones; también se utilizaron, como control, frecuencias de HLA aportadas por otros autores y referidas a negros, orientales, italianos, sardos y franceses. A partir de las distancias genéticas se obtuvieron los árboles de parentesco correspondientes.

Los dendrogramas de relaciones genéticas evidencian que se da un mayor grado de parentesco genético de vascos, españoles de Madrid y argelinos de Argel entre sí, que el de esa tríada con italianos, sardos, franceses, alemanes, orientales o negros africanos (bosquimanos). Confirmábanse de ese modo los resultados obtenidos en el Taller de Histocompatibilidad de 1991, en el que los grupos vasco y español estaban separados de los blancos europeos y cercano al grupo africano. Nuestra confirmación con una metodología más fina en cuanto a selección de individuos y trabajando con secuencias HLA de ADN de las mismas poblaciones (secuenciación de genes HLA de clase II, además) refuerza la verosimilitud de las conclusiones. A mayor abundamiento, hemos añadido datos de una población norteafricana (argelinos de Argel) de los que se carecía en el Taller de Histocompatibilidad de 1991.

Para ponderar la fiabilidad que aporta el sistema HLA en las comparaciones entre poblaciones, conviene recordar la altísima variabilidad de los *loci* A, B, DR y DQ. En razón de tan notable polimorfismo, para encontrar un individuo igual a otro, tarea harto difícil, hay que rastrear en una muestra extensísima; piénsese, para hacerse una idea, en lo que cuesta hallar un donante HLA idéntico en un trasplante de médula ósea. Pese a todo, los individuos de una determinada población o etnia guardan un parecido más estrecho entre sí que con individuos de otros grupos. Ello se debe a que el polimorfismo del sistema HLA permite que las frecuencias características de determinados genes HLA propios del grupo fundador de la etnia persistan todavía, a pesar de las muchas mezclas ocurridas en el tiempo.

Tal es la fuerza de singularización individual del sistema HLA, que suele recurrirse a ellos para dilucidar los casos de paternidad dudosa. La potencia de discriminación del sistema es mayor que la conjunta de los grupos sanguíneos AB0, Rh, MNS, Duffy, Kidd, Lutheran, P, Xg, Lewis-Secretor, PGM1, EsD, ADA, AK, Hp, Tf, Gc y Gm.

Se aplica también esa metodología cuando se trata de discriminar entre poblaciones. Los alelos A36 y A43, por ejemplo, son específicos de negros; los B*1522, B*3510, B*3514 y B*3516, de amerindios; los alelos A30 y B18 abundan entre los mediterráneos, en quienes es baja, por contra, la frecuencia del B39. Se observa, además, un notable sesgo en favor del ligamiento entre determinados alelos de *loci* vecinos (A y B; DR y DQ), que definen haplotipos HLA específicos de poblaciones. Así la tríada alélica A33-B14-DR1 es propia de individuos mediterráneos; la tríada A30-B18-DR3, de iberos y paleonorteafricanos; A29-B44-DR7, de europeos occidentales.



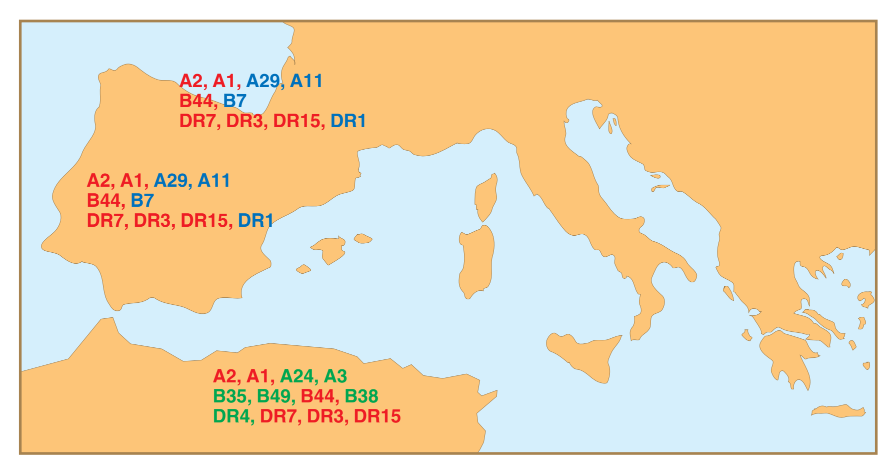
3a. EVOLUCION DE LAS POBLACIONES de Africa. Entre el año 7000 y el 3000 antes de nuestra era, intervalo temporal precedente a la revolución neolítica, la población estaba constituida por cinco grupos principales: hamitas, negros, pigmeos, nilo-saharianos y bosquimanos. Los hamitas poblaban las costas del Mediterráneo y se subdividían en bereberes, egipcios y etíopes "blanquinegros".

3b. EN EL AÑO 400 d.C., los negros del golfo de Guinea habían desplazado a otros grupos. Los pigmeos habían quedado reducidos a pequeños enclaves aislados. El valle del Nilo había conocido un gran crecimiento demográfico, paralelo a su supremacía cultural. En el siglo VII-VIII, poblaciones procedentes de la península Arábiga invadieron gran parte de Africa, sobre todo del norte, y la península Ibérica.

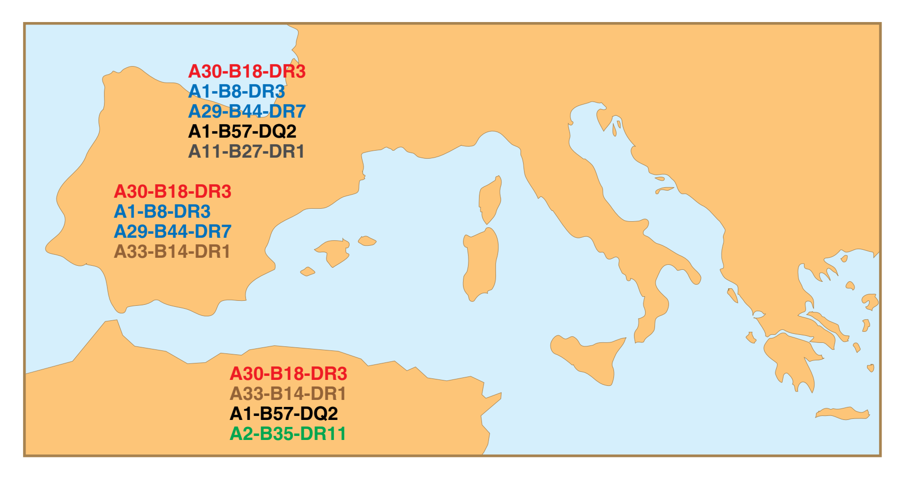
Se halla, pues, asentada la capacidad del sistema HLA para identificar poblaciones por alelos específicos de poblaciones, frecuencias altas o bajas específicas y haplotipos característicos de poblaciones. No debe combinarse ese método con ninguno otro. En efecto, cuando en el estudio se mezcla el análisis del sistema HLA con otros sistemas menos polimórficos, con el de grupos sanguíneos, por ejemplo, se pierde información. Lo que no significa que no pueda completarse el examen HLA de las poblaciones con los de otros sistemas genéticos menos polimórficos utilizados en paralelo.

Los vascos ocupan una posición singular dentro de una hipotética población ibérica y paleonorteafricana emparentada. La arqueología y la lengua dan fe de que los vascos mantuvieron cierto aislamiento, aunque compartan hoy frecuencias de genes similares al resto de los españoles y poblaciones paleonorteafricanas (no árabes). La distinción de los vascos basada en los grupos sanguíneos —frecuencia alta de Rh negativo y baja frecuencia del grupo B—, que estableciera Arthur Mourant en 1947, carece de validez.

La alta frecuencia de Rh negativo es una característica no sólo de los vascos (frecuencia génica 0,44, en vascos españoles), sino también de los europeos occidentales (portugueses 0,54; Isla de Man 0,43; españoles 0,38; franceses 0,41; irlandeses 0,41). La baja frecuencia génica del grupo B también es compartida entre los vascos (0,03) y portugueses (0,05), irlandeses (0,07), españoles (0,06) y franceses (0,06). Es decir, las frecuencias observadas en el Rh negativo y del grupo sanguíneo B no separa a los vascos de las poblaciones vecinas, lo que apoya un parentesco ancestral con ellas.



4. ALELOS HLA más frecuentes en las poblaciones vasca, española de Madrid y argelina de Argel. En rojo aparecen los alelos génicos de alta frecuencia comunes a vascos, españoles de Madrid y argelinos de Argel; en azul, los comunes a vascos y españoles de Madrid, y en verde los específicos de argelinos.



5. HAPLOTIPOS HLA más frecuentes en las poblaciones vasca, española de Madrid y argelina de Argel. En rojo aparece el haplotipo paleonorteafricano, integrado por los alelos A30-B18-DR3, que comparten vascos, españoles de Madrid y argelinos de Argel. En azul, los haplotipos comunes a españoles de Madrid y vascos; es decir, el haplotipo A1-B8-DR3, o "celta"-centroeuropeo, y el haplotipo A29-B44-DR7, de europeos del oeste. En color amarillo, se indica el haplotipo común a españoles de Madrid y argelinos de Argel; es un haplotipo mediterráneo: A33-B14. En color negro, el haplotipo A1-B57-DQ2, exclusivo de vascos y argelinos de Argel. Por fin, en verde, el haplotipo de argelinos de Argel A2-B35-DR11; se ha encontrado también entre italianos y griegos (mediterráneo). En gris, A11-B27-DR1 se ha encontrado exclusivamente en vascos.

De acuerdo con nuestros trabajos con genes HLA, y los de otros autores, existe una estrecha relación de parentesco de españoles de Madrid y vascos con paleonorteafricanos (bereberes argelinos). Anne Cambon de Toulouse, utilizando genes cercanos a los HLA, encuentra grandes similitudes entre vascos y norteafricanos; Santachiara-Benerecetti de Pavia ha encontrado claras homologías entre vascos y sardos utilizando marcadores del cromosoma Y. Hemos descubierto que existen haplotipos raros que, sin embargo, comparten vascos y argelinos de Argel, como el formado por los *loci* A1-B57-Cw7-DR7-DQ2. El haplotipo A33-B14-DR1, común a españoles de Madrid y argelinos de Argel, lo poseen también otras poblaciones del norte del Mediterráneo. Por su parte, A2-B35-DR11 es común a argelinos de Argel y a otras poblaciones del norte del Mediterráneo.

El haplotipo A30-B18-Cw5-DR3, muy raro en las poblaciones europeas, aparece con una frecuencia alta en sardos, vascos y españoles de Madrid. Lo mismo en vascos que en españoles de Madrid se trata del tercer haplotipo más frecuente; entre los argelinos de la capital, donde se da, según hemos descubierto nosotros, es el segundo haplotipo más frecuente en la población.

El primer haplotipo HLA más frecuente en españoles de Madrid y en vascos es el A29-B44-DR7. Lo presentan de forma característica las poblaciones europeas del oeste. Así, es alto entre los habitantes ingleses de Cornualles y en ingleses del sur, en general. En este punto, hay que añadir que Solano Peña, en su obra *The hamitic group of languages*, considera a las lenguas galesa e irlandesa (junto a la vasca

y bereber) como lenguas hamíticas. Estos datos genéticos y lingüísticos podrían apuntar a que la población hamítica preneolítica no estaba tan sólo confinada al norte de Africa, sino que ocupaba gran parte de la península Ibérica, sur de Francia, islas del Mediterráneo e islas Británicas. Solano Peña postula que el fenotipo Rh negativo (de distribución geográfica similar a A29-B44-DR7) es un marcador hamítico.

Por consiguiente, si bien los argelinos de Argel tienen una herencia genética HLA similar a vascos y españoles de Madrid, también hay diferencias básicas, como las que marca el postrer haplotipo mencionado. En efecto, el haplotipo A29-B44-DR7 podría resultar un verdadero marcador de los habitantes "autóctonos" primitivos (efecto fundador) de Europa del oeste. Por contra, el haplotipo A1-B8-DR3, también frecuente en españoles de Madrid y vascos (segundo y tercero más frecuentes, respectivamente), tendría un origen "céltico"-centroeuropeo.

En el estado actual de la investigación, es decir, según las frecuencias de los genes HLA, las distancias genéticas de los vascos o su parentesco con respecto a otras poblaciones proceden así, de mayor a menor: españoles de Madrid, argelinos, franceses, alemanes, italianos, sardos, japoneses y negros africanos. Los árboles de emparentamiento HLA corroboran que los vascos guardan un parentesco más estrecho con los españoles de Madrid y argelinos que con el resto de los europeos. El haplotipo A11-B27-DR1 se ha encontrado únicamente en vascos; todo indica que es la huella característica de la población ibera preneolítica, fundadora, de la cual descendería, en parte, la actual vasca.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HUMAN POLYMORPHIC GENES WORLD DISTRIBUTION. A. K. Roudchoudhury y M. Nei. Oxford University Press, Oxford, 1988.

THE HISTORY AND GEOGRAPHY OF HUMAN GENES. Ll. Cavalli-Sforza, P. Menozzi y A. Piazza. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1994.

HLA ALELE AND HAPLOTYPE FREQUENCIES IN ALGERIANS: RELATEDNESS TO SPANIARDS AND BASQUES. A. Arnáiz-Villena y colaboradores. *Human Immunology*, vol. 43, páginas 259-268, 1995.

Un grillo robot

¿Sería un sencillo sistema electromecánico capaz de reproducir la complejidad de la conducta de un ser vivo? Había una forma segura de averiguarlo

Barbara Webb

Cuando de cierto comportamiento se dice que es robótico, nor-malmente se pretende destacar su predictibilidad. Trátese de una aburrida cajera de supermercado o de un conocido poco renombrado por su espontaneidad, podríase decir que el comportamiento robótico se caracteriza por que en las interacciones con el medio, o en las situaciones que puedan acontecer, la respuesta consiste en una serie de reacciones en apariencia automáticas.

Cabría pensar que la conducta de los insectos es, asimismo, robótica o automática. Sin embargo, al investigar con detalle las acciones específicas de algunos insectos se ha revelado una diversidad mucho más amplia de lo que tal caracterización haría pensar. Tenemos un ejemplo al caso en la hembra del grillo, cuando trata de localizar a un macho por el canto de reclamo que éste emite. En ciertos aspectos, tal actividad parece muy sencilla: al oír el canto apropiado, la hembra es capaz de caminar en dirección hacia el mismo durante horas, incluso al colocarla, en el laboratorio, sobre una rueda de andar.

No obstante, investigaciones efectuadas a lo largo de los veinte últimos años han sacado a luz multitud de sutiles detalles en esta conducta básica. Por ejemplo, la hembra logra distinguir de cualquier otro ruido el canturrio de un macho de su propia especie y acercarse a ese macho concreto incluso cuando otros machos de su misma especie estén ofreciéndole al propio tiempo serenatas y cantos casi idénticos. Seguimos todavía sin comprender con plenitud cómo logra la hembra esta y otras proezas afines.

Análogamente, el comportamiento de los robots puede parecer, a la vez, trivial y complejo. Por muy simple que un robot sea, la interacción de sus sensores y sus actuadores con el



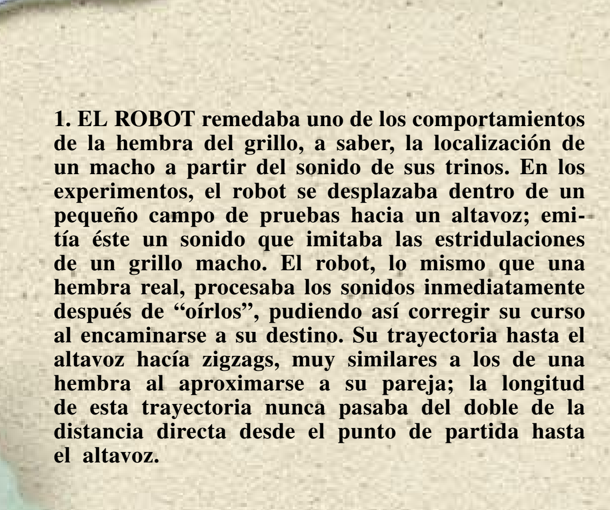
medio en que se desenvuelve resultará siempre complicada. Lo cual entraña que, de ordinario, la obtención de respuestas fiables y automáticas ante un estímulo se torne más difícil de lo que podría esperarse. Así, para lograr que un robot con ruedas se desplace en línea recta no basta proporcionar idéntica potencia a los motores de cada lado. Las tolerancias mecánicas de los motores, de los elementos de transmisión y de las ruedas exigirán la aplicación de potencias ligeramente diferentes para conseguir que las ruedas giren a la par. También serán variables las fuerzas de inercia y de rozamiento, lo que obligará a ir ajustando la potencia en cada instante, y a corregir los errores, por medición de la velocidad de giro y realimentación. Y aun cuando las ruedas giren a la misma velocidad, las irregularidades del terreno o la distinta adherencia de su superficie serán responsables de que el robot se desvíe de la trayectoria rectilínea, salvo que disponga de algún tipo de "brújula" que le permita modificar la velocidad de las ruedas y contrarrestar la desviación.

La compensación de los complejos efectos debidos al entorno parece exigir, pues, algoritmos de control de igual complejidad. Pero, ¿ha de ser necesariamente así? Un enfoque distinto, cada vez más difundido en robótica, consiste en diseñar el robot de modo que éste, más que resistirse al medio, le saque partido al entorno. Por ejemplo, en lugar de pretender que el robot viaje en línea recta, podríamos programarlo para que siguiese trazados del terreno conducentes a su destino, trayectos que, en lugar de coronarlos, circunvalen los montículos que pudiera haber en la ruta. Gracias a métodos tales, conductas que en el robot parecen complejas pueden ser fruto de un algoritmo controlador de una sencillez sorprendente.

Con el propósito de investigar estas cuestiones, he diseñado y construido un "grillo" robótico basado en principios, algoritmos y mecanismos bastante sencillos. Tenía la esperanza de que el comportamiento de mi robot reflejase en buena medida la complejidad del comportamiento de un insecto real situado en un entorno similar. Asimismo, alentaba la esperanza de arrojar un poco de luz sobre alguno de los aspectos neurobiológicos implícitos en el comportamiento del grillo.

Obviamente, no era posible que el modelo reflejase con minucia todos los aspectos de la conducta del grillo; opté, pues, por elegir la actividad, específica aunque importante, antes mencionada: la capacidad de la hembra para identificar y localizar a uno de los machos cantantes de su propia especie. (Este proceso de traslación hacia un sonido específico, junto con la totalidad de requisitos sensoriales y deambulatorios que conlleva, recibe la denominación de fonotaxis.)

Las hembras son sumamente selectivas con respecto a los sonidos que las atraen. En el canto, la característica más distintiva es, sobre todo, la frecuencia subyacente, o frecuencia portadora. Los machos pueden producir tonos prácticamente puros frotando un ala contra otra (estridulación), y las hembras de la misma especie responden de forma óptima a ese tono y no a sonidos más agudos o más graves que la nota de la portadora, cuya frecuencia ronda, en general, en torno a los 4,5 kilohertz. En segundo lugar, también el ritmo del canto del macho, al abrir y cerrar éste las alas, es peculiar de cada especie (se dice que tiene especificidad de especie). Cada fricción de las alas crea un sonido característico que recibe el nombre de "sílaba"; se ha establecido experimentalmente que la frecuencia con que el insecto macho repite las sílabas —la tasa de repetición silábica— constituye el criterio principal de esta pauta para suscitar la respuesta de la hembra.



1. EL ROBOT remedaba uno de los comportamientos de la hembra del grillo, a saber, la localización de un macho a partir del sonido de sus trinos. En los experimentos, el robot se desplazaba dentro de un pequeño campo de pruebas hacia un altavoz; emitía éste un sonido que imitaba las estridulaciones de un grillo macho. El robot, lo mismo que una hembra real, procesaba los sonidos inmediatamente después de "oírlos", pudiendo así corregir su curso al encaminarse a su destino. Su trayectoria hasta el altavoz hacía zigzags, muy similares a los de una hembra al aproximarse a su pareja; la longitud de esta trayectoria nunca pasaba del doble de la distancia directa desde el punto de partida hasta el altavoz.



Aunque en muchas especies el sonido presenta una mayor estructuración —verbigracia, las sílabas se repiten de tres a cinco veces, formando un grupo conocido por “chirrido”— muchas hembras solamente responden a cantinelas generadas por sílabas repetidas una y otra vez, separadas por un intervalo invariable. La hembra, amén de distinguir el ritmo y el sonido correcto de un macho de su especie, debe poder hacerlo incluso cuando cierto número de posibles consortes la cortejan simultáneamente con sus serenatas. No sabemos bien cómo lo hace, pero se las arregla para encaminarse tan sólo hacia uno de estos pretendientes, ignorando a los demás.

En el laboratorio, la grilla muestra preferencia principal por las estridulaciones de mayor volumen; al serle ofrecidos dos cantos que tengan ambos la tasa idónea de repetición silábica, la hembra se encamina hacia el más fuerte: una mayor intensidad sonora puede indicar que el macho es más vigoroso, o sencillamente, que está más próximo. Sin embargo, aparte de la intensidad o volumen sonoro, los investigadores no han conseguido establecer en los cantos naturales otras características específicas que los hagan preferidos por las hembras.

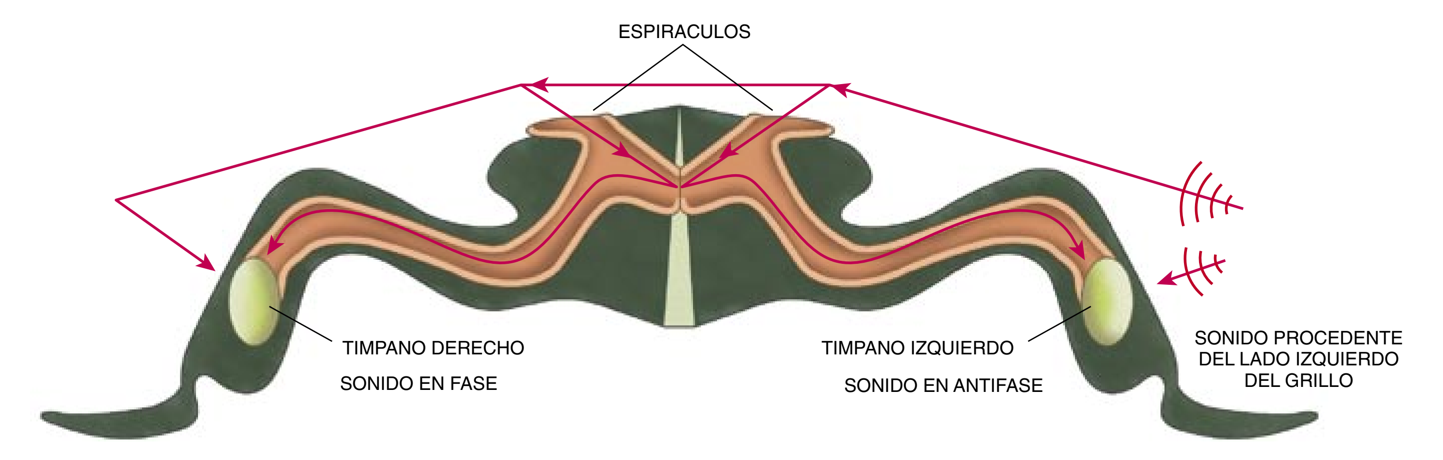
Una vez elegido el adecuado grillar y, en caso necesario, seleccionado un canto entre varios ejemplos del mismo, la hembra tiene que localizar físicamente la fuente sonora, vale decir, ha de encaminarse hacia ella y encontrarla. La única prueba de que la hembra ha reconocido o elegido el sonido es que se desplaza en dirección a él. Por consiguiente, es posible que bastase un solo proceso —la capacidad de localizar únicamente ciertas clases de sonidos— para producir el comportamiento observado. De ser así, podríamos reproducir la conducta aparentemente selectiva de la hembra del grillo construyendo un robot en el que el mecanismo que lo faculta para localizar sonidos funcionase tan sólo para los sonidos de tipo correcto.

El grillo posee un mecanismo sensorial bastante ingenioso que lo capacita para detectar la dirección de las fuentes sonoras. Sus oídos se encuentran en las patas delanteras, y dado que el cuerpo del insecto constituye un débil obstáculo para los sonidos de baja frecuencia, la diferencia de intensidad, o amplitud, del sonido recibido en cada uno de sus dos oídos es muy pequeña. Sí existe una diferencia en los tiempos de llegada del sonido, pero tal diferencia se mide en microsegundos y escapa a la sensibilida detectora de las neuronas auditivas del animal.

El sonido viaja a lo largo de un tubo traqueal que conecta entre sí ambos oídos y con otras aberturas adicionales más distantes, llamadas espiráculos, situadas a ambos lados de la parte superior del tórax del grillo. Por tanto, el sonido llega al oído tanto desde el exterior como por el interior, a través del conducto, tras haber recorrido distancias distintas. El tiempo que el sonido invierte en recorrer el tubo traqueal provoca un desfase. En el tímpano, las ondas sonoras se componen aditiva o sustractivamente según su fase relativa, la cual depende también de la dirección del sonido. Por consiguiente, la amplitud de las correspondientes vibraciones del tímpano representa la dirección de la fuente sonora [*véase la figura 3*]. La amplitud, como conviene que sea, es mayor del lado más próximo al sonido.

Los “oídos” del robot construido por mí eran micrófonos diminutos. Diseñé, con gran ayuda ajena, un circuito electrónico que procesara las señales de manera que remedase las funciones fundamentales del sistema auditivo de un grillo. Uno de los principios fundamentales de este sistema es que el tubo traqueal del grillo conduce óptimamente los sonidos de la frecuencia correspondiente al canto de cortejo deseado, y en esta transmisión los desplazamientos de fase están adaptados a esa longitud de onda particular. El mecanismo no detecta fiablemente la dirección de los sonidos correspondientes a otras frecuencias. Dicho de otro modo, al basarse en desplazamientos de fase sintonizados nada más a la longitud de onda correcta, el sistema auditivo desprecia inherentemente los sonidos de longitud de onda inadecuada, porque no producen una respuesta direccional.

El robot consistía en un pequeño vehículo, de forma cúbica y de unos 20 centímetros de lado. Construido con piezas de Lego, disponía de dos ruedas motrices y de una ruedecilla loca en la parte delantera. Al ser mucho mayor que un grillo, sus “oídos” estaban más separados, por lo que opté por usar una frecuencia bastante inferior (2 kilohertz) para el canto encargado de atraerlo. La



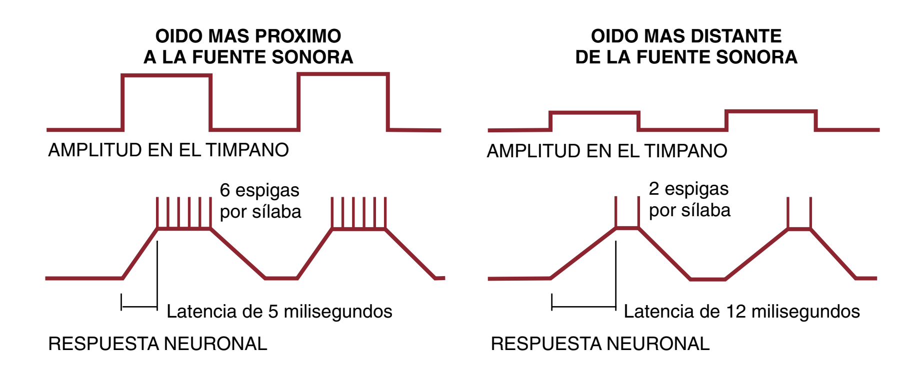
2. EL CUERPO DEL GRILLO canaliza los sonidos a través de un conducto traqueal interno que conecta los oídos del insecto no sólo entre sí, sino también con dos aberturas, llamadas espiráculos, situadas en lo alto del tórax (*arriba*). Cada oído se encuentra cerca de una articulación de la pata delantera (*en la fotografía, a la izquierda*). A causa del conducto, el sonido alcanza cada oído por dos vías: directamente, desde la fuente sonora, e indirectamente, a través del conducto, desde los espiráculos y el otro oído. Para llegar al oído más próximo a la fuente sonora, el sonido que ha viajado directamente hasta el exterior del tímpano ha de recorrer menor distancia que el llegado a través del tubo hasta la cara interna del tímpano. A causa de esta diferencia de distancias, el sonido que arriba hasta uno de los lados del tímpano se halla en antifase con respecto al llegado por el otro. Las ondas en antifase se suman en este tímpano, provocando una vibración de mayor amplitud, percibida como un sonido de mayor intensidad.

salida del circuito microfónico proporcionaba una señal cada 30 milésimas de segundo. Esta señal correspondía a la vibración del tímpano. La señal, remedando lo que sucede en el sistema auditivo real del grillo, tenía, para sonidos de la frecuencia seleccionada, una amplitud mayor del lado de la fuente sonora. En la práctica, sin embargo, los oídos del robot sólo señalaban la dirección correcta en un 90 por ciento de los casos como máximo, a causa de ruidos espurios en el altavoz, en la sala o los producidos por los propios motores del robot.

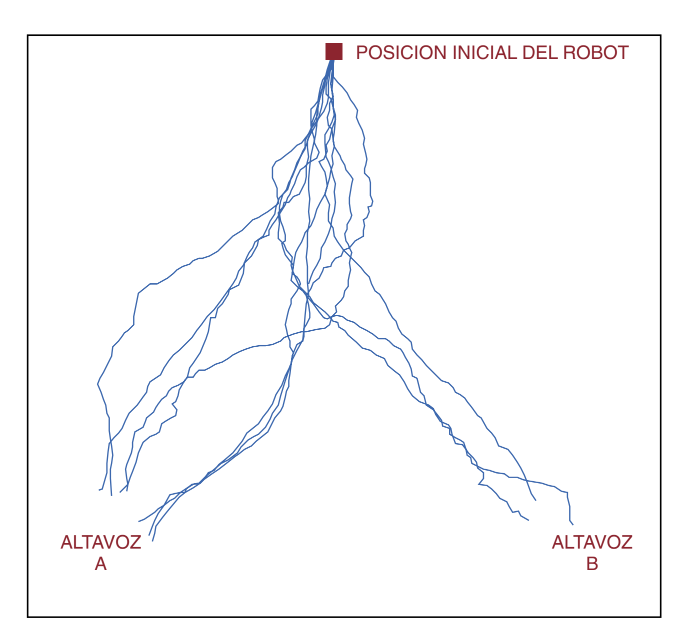
La diferencia en amplitud de vibración en los tímpanos tiene que codificarse neuralmente para poder compararla y utilizarla en la determinación de la respuesta del motor. En el grillo hay por cada oído unas 50 neuronas sensoriales que convergen en un pequeño número de interneuronas del sistema nervioso central del insecto. Dos de estas interneuronas —conectada una al oído izquierdo y la otra al derecho— constituyen un par que posee, a lo que parece, importancia crítica para la fonotaxis. Los neurofisiólogos pueden medir y manipular la excitación de este par neuronal mientras que el animal deambula en respuesta a la estridulación. Han podido demostrar así que el animal siempre gira hacia el lado en el cual uno de los miembros de este par neuronal está respondiendo con mayor intensidad.

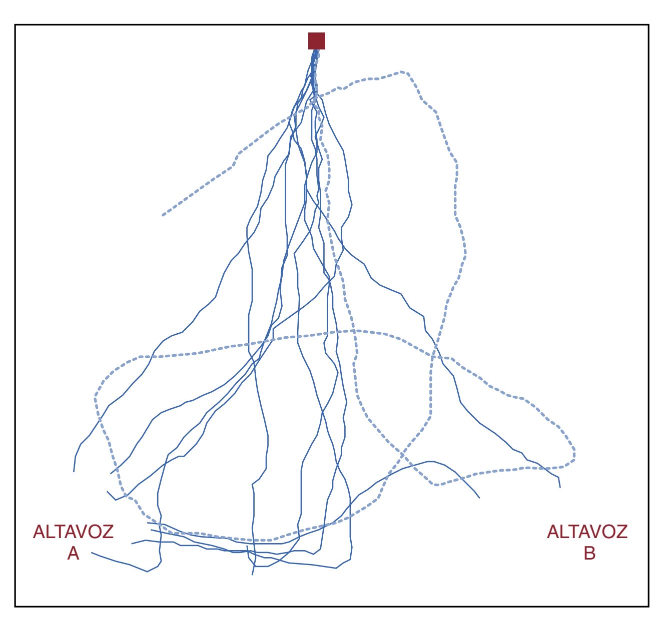
Cuando se recibe una estridulación, cada miembro del par neuronal suma las señales llegadas de las neuronas sensoriales del oído correspondiente, y una vez alcanzado cierto umbral, se activa y emite impulsos. La rapidez con que se alcanza la excitación y emisión correspondiente depende de la intensidad de la señal de entrada; también la frecuencia de los impulsos está en íntima correlación con tal intensidad. Dos son, por consiguiente, las formas en que las vibraciones de los tímpanos quedan codificadas por la actividad de las neuronas: la latencia (tiempo transcurrido antes de que las neuronas comiencen a emitir) y la tasa de emisión neuronal durante la estridulación. Concluido el impacto sonoro, la neurona tarda un breve tiempo en retornar a su estado de reposo. Si durante este tiempo de recuperación empieza otro sonido, la emisión de impulsos recomienza más rápidamente, porque la neurona se encuentra ya próxima a su umbral.

La forma más obvia en que el sistema nervioso de la hembra del grillo podría servirse de esta respuesta para localizar la fuente sonora consistiría, en cada estridulación, en volverse hacia el lado del que antes da comienzo la activación neuronal. (Se estaría dirigiendo así hacia el lado en el que el sonido suena más próximo.) Una consecuencia importante de esta hipótesis es que las respuestas solamente se producen al principio de una estridulación. Lo que



3. LA RESPUESTA DE LA INTERNEURONA AUDITIVA depende de la dirección de la fuente sonora. La amplitud mecánica de la vibración del tímpano (*ondulaciones superiores*) es mayor en el tímpano más cercano a la fuente sonora (*arriba, izquierda*). Cada “cuadrado” de la forma de onda corresponde a la respuesta a una estridulación (una “sílaba”) de un grillo macho. La interneurona que corresponde al oído más cercano al sonido responde a la vibración de superior amplitud elevando su potencial de forma relativamente rápida por emisión de seis “crestas”, o espigas, de potencial (*abajo, izquierda*). En el caso del oído más alejado, la subida de potencial es más lenta y el número de espigas, menor (*derecha, abajo*).





4. LAS TRAYECTORIAS seguidas por el robot eran esencialmente indistinguibles de las seguidas por una hembra real. Los ensayos se llevaron a cabo en un "campo de pruebas" de cuatro metros de largo por 3,3 de ancho. Cuando los sonidos, conocidos por sílabas, los emitían simultáneamente dos altavoces, el robot se limitaba a viajar hasta uno de los dos (*izquierda*). También las hembras se desplazan hasta uno solo de los machos cuando son varios los que la cortejan con su canto. Cuando las sílabas fueron alternándose entre los dos altavoces, las trayectorias del robot se tornaron mucho menos precisas, y el vehículo acaba, con frecuencia, dando vueltas entre los dos altavoces (*derecha*). En esta situación, también las hembras exhibieron una conducta similar.

encaja a la perfección con el dato de que la repetición silábica constituye el factor de máxima importancia al determinar si una hembra responde a un canto. Si el sonido es continuo o si se repite con tanta rapidez que no da tiempo a que la neurona se recupere, la emisión de impulsos será continua. En tal caso, quedará sin definir de qué lado empezó antes la excitación de las neuronas. Por otra parte, si el sonido se repite con demasiada lentitud, la información relativa al lado hacia el cual ha de girar llegará con menor frecuencia y puede no ser suficiente para guiar a la hembra hacia el macho. Como es obvio, lo ideal sería una frecuencia específica de repetición, comprendida entre estos dos extremos.

En lugar de comparar los tiempos de activación, cabe la posibilidad de comparar las frecuencias de emisión de impulsos, que son, al parecer, las responsables de que la hembra gire hacia el lado que se encuentra emitiendo impulsos más frecuentemente. (Tal respuesta se corresponde también con la de que el insecto se oriente hacia el lado donde el sonido parece más próximo.) Dicho mecanismo constituye la hipótesis más difundida entre los neurofisiólogos, a pesar de que no existen pruebas concluyentes en favor de una u otra posibilidades. Siendo la frecuencia de emisión la que señalará la dirección asociada a una determinada pauta sonora —ya sea sonido continuo, ya sea la repetición rápida o lenta de una sílaba—, tal hipótesis requiere que el insecto disponga de procesos nerviosos adicionales en cuya virtud selecciona los cantos dotados del ritmo correcto. De hecho, se han descubierto en el cerebro del grillo ciertas neuronas que, según parece, poseen esta propiedad.

A pesar de tales datos, utilicé para mi robot un algoritmo basado en la comparación de los tiempos de excitación, despreciando la frecuencia de emisión de los impulsos. Era mi deseo verificar la hipótesis de que un mecanismo tal permitiría explicar la selectividad observada en la hembra con respecto a ciertos cantos, sin necesidad de suponer procesos neurales de nuevo tipo. Dado que el sistema sensorial de mi robot se basaba en determinada longitud de onda sonora, y que su comparador "neural" dependía de cierto ritmo particular, no tenía necesidad de seleccionar activamente el sonido correcto; se limitaba, sencillamente, a no funcionar con cantos inadecuados. Si mi robot funcionase bien en la localización de los cantos apropiados, conferiría verosimilitud a la hipótesis de que el mecanismo de localización de los grillos podría también funcionar de igual modo.

No resultó extremadamente difícil programar el robot para que actuara de esa forma. Tenía por "cerebro" un microprocesador 68000, programado para recibir estímulos sensoriales diversos y mandar órdenes de arranque y parada al motor izquierdo y al de la derecha. El robot portaba micrófonos y un circuito que recreaban el retardo y cancelación de fase del sistema auditivo del grillo; además, poseía conmutadores de infrarrojos y de volumen que le permitían detectar los obstáculos interpuestos. El propio programa de control constaba de un centenar de líneas de código.

Las lecturas procedentes del circuito auditivo se procesarían en tiempo real. Si un lado alcanzara primero el umbral preestablecido, se detendría entonces brevemente ese costado, provocando un pequeño cambio de dirección. Si prosiguiera el sonido, la estimación superaría el valor umbral y no se desencadenaría respuesta alguna. Si se suspendiese el sonido, el valor estimado tende-

BARBARA WEBB se graduó en psicología (con premio extraordinario) en la Universidad de Sydney en 1987 y se doctoró en inteligencia artificial en la Universidad de Edimburgo en 1993. En la actualidad es profesora en el departamento de psicología de la Universidad de Nottingham, donde enseña inteligencia artificial.

ría a cero, a imagen del tiempo de recuperación que se había observado en la neurona del grillo. Por consiguiente, sólo el sonido discontinuo y frecuentemente repetido determinaría que el robot respondiera orientándose hacia la fuente sonora.

El robot procesaba el sonido con mayor lentitud que el insecto. Por eso, hubo que aminorar en un factor de 10 la pauta silábica del sonido, esto es, hasta 300 milésimas de segundo por sílaba. Pese a esta pauta morosa del sonido, el robot seguía orientándose hacia la fuente con suficiente rapidez, a un paso no muy distinto de una hembra real. En otras palabras, el robot cambiaba de dirección a la velocidad del grillo pese a recibir información sólo a un décimo de su velocidad. El robot tenía, pues, que habérselas con una tarea más dura.

Sometí al robot a una serie de ensayos. En cada uno, puse en marcha el robot en un lado de un pequeño campo de pruebas y registré la trayectoria que seguía hacia un altavoz que emitía el sonido. Cuando las sílabas tenían la duración y frecuencia ideales (300 milisegundos y dos kilohertz, respectivamente), el robot se encaminaba hacia el altavoz siguiendo una trayectoria serpeante muy similar a la observada en una fonotaxis real de una hembra. Esta senda nunca cubría más del doble de la distancia directa desde la partida hasta la meta [*véase la figura 4*]. Al colocar obstáculos entre el punto de partida y la fuente sonora, el robot los sorteaba, camino del altavoz.

Con el fin de descubrir de qué modo reaccionaría el robot ante sonidos de características no ideales, llevé a cabo una serie de ensayos con diferentes frecuencias silábicas. Cuando aumenté la tasa de repetición silábica (con sílabas y pausas de duración inferior a 200 milisegundos), el programa del robot se volvía incapaz de seguir detectando las pausas intercaladas en el sonido. Enviaba muy pocas señales de giro a los motores, guiando al robot en líneas rectas por el campo de pruebas. Si llegaba a dar con el altavoz, era sobre todo por azar. Cuando reduje la frecuencia (sílabas y pausas de duración mayor de 500 milisegundos), también su éxito era menor que en el caso ideal. Giraba con menor frecuencia y el robot acababa siguiendo una trayectoria curva en la dirección general del altavoz, al que muchas veces dejaba de alcanzar. Aunque yo esperaba que el robot solamente tuviera éxito en un margen de tasas silábicas, descubrí posteriormente que también las grillas tienden a seguir trayectorias curvas con tasas bajas y a fracasar más con las demasiado altas. Así pues, el robot no sólo actúa con el éxito de una hembra, sino que tiende también a fracasar de igual manera que ella.

5. DIFERENCIAS entre grillos reales y robóticos. Unos discrepan de otros en muchos atributos físicos, entre ellos, el tamaño. En los experimentos, la autora adaptó a la escala del robot las características de los sonidos y del ambiente. Sin embargo, en experimentos futuros se manejarán robots del tamaño de un grillo con grabaciones de cantos de grillos macho campestres.

En realidad, el canto del grillo macho consiste en una serie de chirridos de unas tres o cuatro sílabas, separadas por períodos de silencio. En la exposición anterior no nos detuvimos en este dato. Durante nuestros ensayos, sin embargo, me pareció que sería interesante ver qué tal navegaba el robot cuando el tren de sílabas se descompusiera en chirridos. Los resultados no fueron concluyentes. El robot podía desplazarse un largo trecho por el campo de pruebas durante los silencios entre chirridos, por lo que tendía a rebasar el altavoz, tardando después algún tiempo en reorientarse. Por otra parte, cuando sí alcanzaba el altavoz, llegaba allí más rápidamente que en el caso de una canturria continua formada por sílabas equidistantemente separadas. Era así porque, cuando todo marchaba bien para la máquina, durante los chirridos tomaba la dirección correcta y durante los períodos de silencio se movía rápidamente hacia el altavoz sin efectuar ajustes adicionales, que consumen tiempo.

Lo mismo que antes, sólo *a posteriori* llegué a descubrir en las hembras una conducta correspondiente: su rastreo es más directo cuando la estridulación se hace en trinos, aunque el comportamiento de giro de una grilla constreñida a permanecer en un punto, medido por los movimientos de las patas (o del abdomen, si está en vuelo), es más acusado en el caso de sílabas continuas. Los ensayos con el robot sugieren que los factores de la situación pueden explicar los efectos de la estructura de los trinos en el desplazamiento de la hembra hacia una posible pareja, sin necesidad de recurrir a mecanismos neuronales adicionales.

Hasta ahora, los resultados habían mostrado que el robot podía remedar la capacidad de reconocimiento y localización de la cantilena correcta que la hembra del grillo posee. Pero, ¿podría este sencillo vehículo, al igual que la grilla, seleccionar entre varios a uno de los machos que la cortejan con su cántico nupcial? Aunque me parecía que no, resultaba fácil hallar la respuesta introduciendo un segundo altavoz en el campo de pruebas y emitiendo los cantos a través de ambos. Para sorpresa mía, el robot no parecía tener dificultad en decidirse (por así decirlo) e iba casi directamente a uno u otro altavoz.

Por haber sido yo quien programó el robot, sabía que no era capaz de

distinguir o decidir entre los sonidos. Al igual que antes, parece que es la interacción de los nada complicados mecanismos del robot con campos sonoros especiales lo que produce este interesante —al par que útil— comportamiento, que podría incluso ser suficiente para explicar la forma en que la hembra selecciona un compañero. Desdichadamente, en estos experimentos no dispuse de suficiente control sobre las propiedades del estímulo para verificar si el robot era capaz de preferir ciertos cantos a otros.

Sí resultó factible, empero, una variante basada en dos fuentes sonoras: pudimos comprobar el comportamiento cuando se escindía el sonido entre los dos altavoces, siendo las sílabas alternativamente emitidas desde uno y otro lados. Sometida una hembra a esta situación, queda confusa y se mueve insegura de acá para allá entre los dos sonidos. El robot hizo más o menos lo mismo.

En su conjunto, estos resultados resultan estimulantes, aunque, como es obvio, el éxito del robot no demuestra por sí mismo que los grillos funcionen de este modo. Sin embargo, sí sugiere otros tipos de posibles interpretaciones de los resultados neurofisiológicos y conductuales. Con mayor generalidad, pone de manifiesto que un mecanismo sencillo de control puede dar lugar a una actuación bastante competente y compleja, en la hipótesis de que interactúe correctamente con su medio. Mis colaboradores y yo estamos ahora reinstalando este mecanismo en un robot más reducido, capaz de procesar el sonido más rápidamente; podríamos luego ponerlo a prueba con grabaciones de cantos auténticos de grillos para ver si lleva a cabo las mismas elecciones que manifiestan las hembras. Si este experimento tiene éxito, tal vez cambie nuestra forma de entender el "comportamiento robótico".

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CRICKET BEHAVIOR AND NEUROBIOLOGY. Dirigido por F. Huber, T. E. Moore y W. Loher. Comstock Publishing Associates, 1989.

PHYSICS OF DIRECTIONAL HEARING IN THE CRICKET *GRYLLUS BIMACULATUS*. A. Michelsen, A. V. Popov y B. Lewis en *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 175, n.º 2, páginas 153-162; febrero de 1994.

USING ROBOTS TO MODEL ANIMALS: A CRICKET TEST. Barbara Webb en *Robotics and Autonomous Systems*, volumen 16, n.º 2-4, páginas 117-132; 1995.

Johannes Grabmeier

Algebra por ordenador: un cálculo simbólico y exacto

Aunque enojosa, no es difícil la multiplicación de dos números. Lo aprendimos en la escuela. Las instrucciones para esa operación elemental caben en el microcircuito de una calculadora de bolsillo. Más enrevesado resulta realizar operaciones aritméticas con letras. Pese a que se nos enseñó en el bachillerato, tropezamos a menudo en su cálculo. Además, hay que conocer un sinfín de reglas. También serán más estrictos los requisitos que debe cumplir el ordenador que pueda sustituirnos en esas operaciones. Por suerte para nosotros, contamos ya con una amplia gama de sistemas disponibles, que no sólo liberan a los profesionales (matemáticos, físicos e ingenieros) de la pesada carga de operar con expresiones formalizadas, sino que realizan cálculos que desbordan la capacidad del ser humano.

Los ordenadores potentes rivalizan entre sí por la cantidad de números de coma flotante que suman o multiplican en un segundo. La simulación de colisiones violentas en la industria del automóvil y las predicciones meteorológicas son sólo un par de muestra de los impresionantes resultados que pueden obtenerse con estas operaciones aritméticas elementales realizadas en número ingente.

Sin embargo, se olvida a menudo que lo calculado no es la solución de una ecuación diferencial —la descripción matemática de una colisión o del tiempo—, sino sólo una aproximación, cuya calidad, en muchos casos, no podemos evaluar. Además, estos cálculos suelen realizarse con un número de cifras limitado, lo que origina errores de redondeo, controlados mediante procesos harto tortuosos.

JOHANNES GRABMEIER trabaja en el laboratorio de investigación de IBM en Heidelberg, en donde colaboró en el desarrollo del sistema de álgebra por ordenador AXIOM.

Cierto es que podemos aproximarnos a las soluciones de ciertos problemas con métodos algebraicos mucho mejor de lo que hasta ahora se había intentado: podemos incluso contar con una fórmula para obtener el resultado cabal. Este es incomparablemente más valioso que cualquier resultado numérico, que siempre será un caso aislado. Sin embargo, al común de los mortales le costará mucho más hallar ese resultado con sólo lápiz y papel que programar un algoritmo numérico. Cualquiera que haya resuelto integrales o derivado funciones complicadas en sus años de instituto recordará cuán sujetos están a errores tales cálculos y lo fácil que es llegar a los límites de lo factible.

De un tiempo a esta parte, los sistemas de álgebra por ordenador han venido apostando a caballo ganador en distintos campos de la ciencia, la ingeniería y la economía. Nos permiten calcular con símbolos y con números exactos de cualquier ristra de cifras en todos los ordenadores, desde los portátiles hasta los más potentes. Para ellos no tienen secreto los problemas clásicos de bachillerato: por ejemplo, discusiones de curvas del cálculo diferencial e integral. Los alumnos, liberados de las operaciones engorrosas y rutinarias, pueden prestar mayor atención y tiempo a los conceptos y aplicaciones y experimentar, de formas antes inimaginables, con las matemáticas. Pero eso exige del profesor un replanteamiento distinto de la clase. He observado ya un cambio radical en la docencia y el aprendizaje que, sin duda, superará, en calidad e importancia, la transformación que supuso la introducción de las calculadoras de bolsillo.

Innovación técnica. Vuelta al cálculo de fracciones

¿Por qué no se emplearon recursos informáticos en los primeros tiempos de la era de los ordenadores, allá por los años cincuenta y sesenta, para realizar cálculos simbólicos y exactos? No fue por falta de ideas ni de visión. En el siglo pasado Ada Augusta, condesa de Lovelace (1815-1852), amiga y mecenas de Charles Babbage (1791-1871), escribió lo siguiente sobre la "Máquina Analítica" de este pionero de los ordenadores [*véase* INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1993, págs. 66-71]: "Mucha gente cree que esta máquina tiene que expresar sus resultados en forma de números y que debería, por tanto, dejar el método algebraico y analítico para operar con otro aritmético y numérico. Grave error. La máquina puede ordenar y combinar magnitudes numéricas como si fuesen letras del abecedario u otros símbolos generales; de hecho, si se tomasen las medidas necesarias, podría expresar los resultados en forma algebraica." Pese a ello, en los primeros decenios de la técnica de ordenadores no se pudieron satisfacer las exigencias de capacidad de memoria y procesamiento que requería el cálculo simbólico. El actual desarrollo espectacular de la mecánica del ordenador, de su hardware, permite un similar despegue del álgebra computarizada.

Los cálculos algebraicos no deberían estar relacionados en modo alguno con los errores de redondeo. Pero la bondad de un resultado es la de su miembro más inexacto; en ciertos casos, además, la exactitud que se le supone a un cálculo simbólico puede perderse por una única cifra en los computadores corrientes, con un número de guarismos limitado. Para los números no enteros, pues, conviene pasar de su representación con coma flotante (con un número finito de cifras) al cálculo de quebrados. Mientras el numerador y el denominador sean números enteros, no habrá errores de redondeo. Tales números pueden ser muy altos. La esencia de todo sistema de álgebra por ordenador consiste, por consiguiente, en una aritmética para realizar cálculos con números enteros arbitrariamente grandes.

Un quebrado expresa una división no llevada a cabo. Podemos, sin embargo, operar con quebrados

—sumar, multiplicar, etc.— e incluso llegar a una situación favorable en que resulte innecesario realizar las divisiones indicadas.

Ahora bien, los cálculos algebraicos, además de números, contienen también letras que sustituyen números (u objetos más complicados) que desconocemos o queremos dejar sin determinar. Desde una perspectiva formal, una expresión algebraica con una incógnita es un cálculo no ejecutado, y de momento inejecutable. Pero podemos combinar ese cálculo con otros de su índole y realizar transformaciones:

$$(x - ay)^3 = x^3 - 3ax^2y + 3a^2xy^2 - a^3y^3$$

En general, carece de importancia lo que nos imaginamos con cada letra; el ordenador no se imagina nada.

Tipos de datos y algoritmos

Si es posible combinar números, letras y demás símbolos mediante sumas, restas, multiplicaciones y divisiones, salvo entre cero, y si de cualquiera de estas operaciones resulta una nueva expresión algebraica, entonces llamaremos cuerpo al conjunto de los términos así obtenibles. Para ello, basta definir la suma y la multiplicación de modo que se cumplan las demás reglas de cálculo. El álgebra por ordenador consiste, en buena parte, en un cálculo en cuerpos abstractos. Abarca, en particular, los cuerpos finitos, que, a diferencia del cuerpo de los números racionales y del cuerpo de los reales, no constan de infinitos elementos. Los cuerpos finitos revisten especial interés en criptografía y en teoría de codificación.

Un polinomio es una expresión en que las incógnitas (x, y, etcétera) aparecen, lo mismo que los números, combinadas exclusivamente mediante sumas, restas y multiplicaciones. Así ocurre en la fórmula antes mostrada. Llamamos función racional a la fracción cuyo numerador y denominador son polinomios. Las funciones racionales forman otro grupo de notable interés en el álgebra por ordenador. Esa es la razón de que en los sistemas de álgebra computarizada exista el tipo de datos "función racional", al igual que encontramos en los lenguajes de programación clásicos el tipo de datos "número entero".

Hemos de incluir las expresiones en funciones básicas elementales, en especial los logaritmos (por ejemplo: $\log(x + 2y)$), las funciones exponenciales ($e^{a + ib}$), las funciones trigonométricas ($sen\,(\alpha + \pi/3)$) y algebraicas ($\sqrt{x^2+1}$) o tang(arctang(x)/5) (*véase el recuadro*), la diferenciación (hallar la derivada de una función) y operaciones combinadas, como por ejemplo el cálculo con series de potencias y matrices. Cada sistema impone su jerarquía de prioridades.

Además de este utillaje básico, algunos sistemas ofrecen algoritmos preestablecidos para solucionar problemas complejos. Estamos pensando, por ejemplo, en la factorización (descomposición en factores primos) de números enteros muy grandes. Muchos sistemas criptográficos depositan su seguridad en ese proceso, más complicado que la mera multiplicación.

En el caso de los polinomios, la operación análoga resulta, en principio, más sencilla. (Tenemos un ejemplo elemental en la resolución de las ecuaciones de segundo grado.) Aunque tal vez sea necesario ampliar el cuerpo de los números racionales con raíces cuadradas. (Para los sistemas de álgebra por ordenador la raíz cuadrada de 2 no es 1,414..., sino un símbolo abstracto, por ejemplo a, que cumple la condición de cálculo $a^2 = 2$. Cuando se trate de raíces de orden mayor deberá procederse igual.) Sin embargo, también es posible hallar soluciones —en el caso de que éstas puedan representarse con raíces— de ecuaciones de grado superior a dos y de sistemas de ecuaciones de este tipo con varias incógnitas. La idea central subyacente bajo este tipo de cálculos recibe el nombre de base de Gröbner, y el procedimiento que nos lleva a la solución de los mismos, algoritmo de Buchberg. Salvo para los casos más sencillos, tales cálculos sólo puede abordarlos el ordenador. Se trata de un dominio de grandes posibilidades de aplicación; la técnica de punta se apoya en bases de Gröbner para construir lo mismo robots que máquinas para limpiar camarones.

El álgebra por ordenador ha entrado también en el terreno de la integración, es decir, la determinación de funciones primitivas cuyas derivadas sean respectivamente las funciones elementales de las que se parte, la solución de ecuaciones diferenciales y la creación computarizada de modelos de grupos: grupos de permutaciones o de matrices.

Los sistemas principales

Los sistemas de álgebra por ordenador REDUCE y DERIVE se fundan —*nomen est omen*— en reglas de substitución de términos (*véase el recuadro adjunto*). REDUCE, que tiene un grupo de usuarios fieles, sigue en perfeccionamiento creciente. DERIVE engatusa a los usuarios porque llega a los resultados deseados ocupando muy poca memoria y escasa gestión de los datos.

El sistema MATHEMATICA ha popularizado el álgebra por ordenador como ningún otro gracias a sus posibilidades gráficas y a una buena estrategia de comercialización. Por su lado, MAPLE posee un sólido armazón matemático y un paquete de programas básicos (núcleo) bastante reducido; se adapta fácilmente a entornos muy dispares. MATHEMATICA y MAPLE encabezan las listas de difusión. Los nuevos conceptos que ha creado la informática, así los tipos de datos abstractos y el diseño por objetivos con distintos mecanismos de herencia, son característicos del sistema AXIOM.

El padre de todos los sistemas de álgebra por ordenador es MACSYMA, cuyos días de mayor gloria, en mi opinión, han pasado ya. Los seis hasta ahora mencionados constituyen el grupo principal de sistemas para todos los usos, entre el que también suele reseñarse MuPAD, de la Universidad de Paderborn. Excepto DERIVE, que está concebido exclusivamente para PC, todos pueden incorporarse en la mayoría de los ordenadores.

Además, existe una amplia gama de sistemas especiales, utilizadas, ante todo, en círculos académicos. La gama de problemas tratados va desde los

La potencia en construcción de gráficos que han alcanzado los sistemas de álgebra por ordenador rozan el virtuosismo artístico. El objeto central rojo es un dodecaedro hiperbólico en el que se ha procedido a la descomposición de sus superficies laterales. El toro violeta está pavimentado de triángulos casi equiláteros. A su alrededor, se enrolla otro toro, creado por la rotación de un hipocicloide a lo largo de un círculo. El hemisferio del fondo se ha deformado con una función sinusoidal. Roland Jakschewitz, de Nuremberg, y Michael Trott, de Champaign (Illinois), han calculado los objetos de esta imagen con el sistema MATHEMATICA; con la ayuda del sistema Explore los han ordenado en un espacio imaginario y les han añadido características materiales, también ficticias, como el coloreamiento y las fuentes de luz



Así trabaja un sistema de álgebra por ordenador

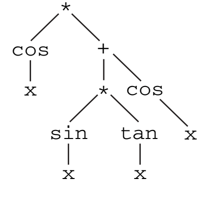
Un sistema para operar con fórmulas —representado aquí por AXIOM— debe trabajar con una expresión algebraica del tenor de

$$\cos x\,(\operatorname{sen} x \operatorname{tang} x + \cos x)$$

Se introduce en el sistema la fórmula en una notación parecida a la del lenguaje Fortran:

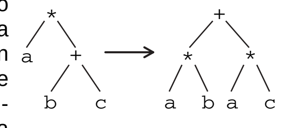
```
f:=cos(x)*(sin(x)*tan(x)+cos(x))
```

El sistema transforma la expresión en una estructura ramificada, que representa en qué orden y con qué operaciones matemáticas (operaciones básicas y funciones especiales como senos y cosenos) se ha de proceder. Cual si fuera un alumno, se apresta a simplificar la expresión tanteando con las reglas de cálculo permitidas. Aquí se le ofrece, en primer lugar, la ley distributiva: en el sistema está incorporada la premisa (revocable) de la conveniencia de eliminar los paréntesis. Llega así a:



$$\cos(x)\operatorname{sen}(x)\operatorname{tang}(x) + \cos(x)^2.$$

El sistema ignora qué sea la ley distributiva. Se ha limitado a buscar en el árbol la pauta “asterisco sobre signo más”. La halló en el punto más alto. En consecuencia, ha sustituido la rama en cuestión por otra, en cumplimiento de la ley distributiva. Los términos *a, b* y *c* de esta regla de substitución pueden ser —como en este caso— ramas enteras propias, con todo lo que de ellas pende.



El sistema tiene a su disposición varias pautas de esa índole. Coloca cada pauta en una de las ramificaciones del árbol; si la pauta se ajusta, remplaza entonces el trozo de rama correspondiente por la pieza sustitutoria correspondiente a la pauta. Lo que significa que puede recurrir a pautas todavía no empleadas. En el ejemplo, después de haber eliminado los paréntesis, empleamos la pauta $a{*}a \to a^2$ para el término $\cos x$. A diferencia de otros sistemas que se basan en la sustitución de términos, en AXIOM las reglas de cálculo de esta primera transformación están integradas en el tipo de dato. Si se indica la orden

```
simplify f,
```

el sistema utiliza otras reglas de sustitución de términos, correspondientes a las reglas de cálculo $\operatorname{tang} x = \operatorname{sen} x / \cos x$ y $\operatorname{sen}^2 x + \cos^2 x = 1$, simplifica el quebrado y nos revela el resultado

$$1.$$

Esta sustitución sintáctica de términos opera, por tanto, según unos criterios bastante superficiales. Los teoremas matemáticos profundos difícilmente pueden desarrollarse con tales herrramientas en una álgebra computarizada. Para que el proceso funcione a plena satisfacción, habrá que perfeccionarlo mucho. En su forma primitiva hubiese sido incapaz de simplificar la expresión $a + b + a$ para obtener $2a + b$, puesto que en ninguna parte aparece la pauta $a + a$ en esta forma. Aquí se realiza una selección previa de todos los sumandos, tras la cual aparece junto lo que debe estarlo.

El orden en que se aplican las reglas de cálculo reviste, por lo común, una importancia primordial. Si procedemos en un orden que no es el más adecuado tal vez no lleguemos nunca al resultado buscado; al menos será más difícil. Un sistema de álgebra por ordenador puede indicar el orden a seguir, efectivo por lo común, aunque a veces el proceso de cálculo desemboca en un resultado imposible o crea un bucle, si una regla anula el efecto de otra. Que sea mejor eliminar que introducir paréntesis dependerá de cada caso particular, y no siempre aparece con nitidez el procedimiento más sencillo. AXIOM, por ejemplo, suele transformar las funciones racionales (cocientes de polinomios) en formas normales (es lo que corresponde aproximadamente a una fracción simplificada). Si se introduce

```
(x**2-1)/(x-1)
```

(el doble asterisco indica la potenciación), obtendremos

$$x + 1$$

lo que es, sin duda, una simplificación. En cambio, el caso

```
r:=(x**12-1)/(x-1)
```

no lo es tanto comparado con

$$x^{11} + x^{10} + x^9 + x^8 + x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1.$$

Otra forma interesante de la misma expresión la hallamos en la representación factorial que el sistema proporciona con la orden

```
factor(r::Polynomial Integer)
```

y que resulta ser:

$$(x+1)\left(x^2 - x + 1\right)\left(x^2 + 1\right)\left(x^2 + x + 1\right)\left(x^4 - x^2 + 1\right).$$

¿Cuál es la más apropiada? Eso depende de lo que el usuario busque, e incluso de sus caprichos personales. Para polinomios, la teoría de las bases de Gröbner aporta un conjunto completo de reglas que se aplican en un orden determinado y que garantizan que en un proceso de cálculo no se creen bucles. Con esto, incluso se puede calcular $a^4 + b^4 + c^4$, si *a, b* y *c* están dados sólo de forma implícita a través de las premisas $a + b + c = 3$, $a^2 + b^2 + c^2 = 9$ y $a^3 + b^3 + c^3 = 24$. El resultado es 69.

Para funciones angulares existe una gran variedad de fórmulas de transformaciones, que en parte tienen efectos contrarios. También aquí la teoría ha podido establecer un orden: con sólo la instrucción `normalize`, AXIOM transformará la expresión

$$\operatorname{sen}(2x)^3 + \left(8\cos(x)^5 - 8\cos(x)^3\right)\operatorname{sen}(x) - \cos(2x)^3 + 8\cos(x)^6 - 12\cos(x)^4 + 6\cos(x)^2 - 1$$

hasta que resulta ser cero.

Una expresión como

```
g:=tan(atan(x)/5)
```

(atan es la abreviatura de arcotangente, la función inversa la tangente) no se puede simplificar más. Sin embargo, satisface una ecuación algebraica que en determinadas circunstancias es todo lo que se quiere saber de ella. La orden `normalize g` también nos proporciona ésta:

$$\left(5g^4 - 10g^2 + 1\right)x - g^5 + 10g^3 - 5g = 0.$$

propios de física hasta la construcción de pavimentos o estructuras moleculares, pasando por la teoría de grupos, la teoría de números y la geometría algebraica. Jacques Laskar, astrónomo francés, ha desarrollado un sistema especial para modelizar la función de estabilidad de la Luna en relación con el clima de la Tierra.

No resulta fácil evaluar, por comparación de unos con otros, la calidad de los sistemas de álgebra computarizada. Los temas incorporados son muy dispares, y no hay acuerdo en determinar qué problemas presentan las notas de importancia y generalidad que pudieran servir de criterio de comparación.

Los sistemas de álgebra por ordenador se le siguen ofreciendo al usuario de acuerdo con el esquema clásico de sistema de diálogo, como es el caso de MS-DOS; aunque se va acentuando la tendencia hacia el empleo de ventanas. El usuario inserta una línea de comando, y el sistema responde con un resultado. Todas las líneas quedan numeradas para su acceso ulterior. El sistema también acepta varias líneas de instrucciones a la vez y las ejecuta según el orden de aparición. Hallan cabida conceptos de la programación clásica, como son las bifurcaciones condicionales y los bucles. Por tanto, el sistema, si así se le indica, ejecuta las instrucciones varias veces o en un orden deseado; la evolución del trabajo pueden condicionarla los resultados intermedios.

Al final aparecen una o varias expresiones algebraicas, aunque quizá no en la forma en que el usuario preferiría observar el resultado. Téngase en cuenta que la diversidad de signos, de distintos tamaños, tipo de letras y posiciones con un orden ingenioso, que caracterizan al lenguaje matemático, no son realizables en muchas pantallas e impresoras o, en caso de serlo, suponen un excesivo derroche. Ello explica que los programas algebraicos se limiten a proporcionar una imitación muy grosera del lenguaje formal de la matemática.

Casi todos los sistemas expresan también sus resultados en una forma adecuada para $\TeX$, el programa clásico de fórmulas matemáticas, lo que permite introducirlos directamente en las publicaciones científicas. MAPLE ofrece un acceso directo a una representación $\TeX$ en pantalla.

La expresión algebraica puede servir de instrucción de cálculo. Por eso, podemos pedirle al ordenador que ejecute en forma numérica, tradicional, tales instrucciones; es decir, sustituyendo las incógnitas por números. Esta concordancia entre el cálculo simbólico y el numérico resulta de especial interés para las aplicaciones. Demos un ejemplo ingenieril. Si, en una construcción, podemos desarrollar algebraicamente una fórmula que dependa de determinados parámetros de un componente de la estructura en construcción, en vez de utilizar un valor numérico para su carga de flexión, entonces podremos determinar numéricamente, en un segundo paso, los parámetros que permitan maximizar dicha carga; ello significa que podremos determinar el elemento de construcción más resistente a la flexión, a saber, el capaz de resistir mayor peso sin doblarse, de entre cuantos deban considerarse. Casi todos los sistemas proporcionan sus resultados, si así se especifica, como segmentos de programa en un lenguaje de programación superior, por lo general en Fortran o en C.

En la mayoría de los casos, se desea obtener una representación gráfica de la función calculada. Es una prestación que ofrecen todos los sistemas de álgebra por ordenador. Caminamos, es mi opinión, hacia una fase en la que estos sistemas no contendrán un paquete de programas para gráficos propio, sino que dispondrán de accesos a otros sistemas gráficos independientes.

Avanzamos, asimismo, hacia una implicación del cálculo simbólico en las demás tareas del ordenador. MATHEMATICA nos ofrece un "cuaderno de notas" que administra y nos presenta conjuntamente elementos de diferentes procedencias: textos, fórmulas, gráficos, etcétera. En un archivo de AXIOM podemos remitir unas partes a otras (una estructura de hipertexto); un apartado programático ("software") especial convierte un archivo en una suerte de diccionario, donde se indica el lugar al que se refiere la remisión, en vez de ceñirse a un número de nota al pie o una flecha. Porta integrado un "ojeador" ("browser"), es decir, un soporte lógico, que nos facilita la búsqueda directa de funciones, tipos de datos y otras informaciones. MathSoft le ofrece al usuario las prestaciones de MAPLE, junto con programas numéricos y de tratamiento de textos en una presentación desarrollada a partir de programas de cálculo de tablas.

De este modo, los sistemas de álgebra por ordenador que hasta ahora eran herramientas especiales restringidas al cálculo simbólico, van progresando para constituirse en elemento componente de los sistemas universales de ordenadores.

Ian Stewart

Vacas en el laberinto

En las matemáticas serias abundan más los laberintos de lo que se podría imaginar. Cualquier investigación matemática exige, en efecto, hallar una ruta que atraviese un dédalo de enunciados; en ella, el camino que va desde cada enunciado al siguiente está constituido por una deducción lógica válida. Un laberinto de nuevo tipo, inventado por Robert Abbott, de Jupiter, en Florida, al que ha bautizado "¿Dónde están las vacas?", es a la vez geométrico y lógico. Lo he tomado de su nuevo libro *Supermazes*. (No faltarán lectores que recuerden que Abbott es el inventor de "Eleusis", un juego de cartas que Martin Gardner comentó en estas mismas páginas hace veinte años.)

El laberinto de Abbott se basa en una retorsión lógica, la denominada autoalusión o sibirreferencia. Los enunciados autoalusivos les plantean quebraderos de cabeza a lógicos y filósofos. Tenemos un ejemplo en la paradoja atribuida a Epiménides, un cretense que proclamaba que todos los cretenses son mentirosos, la cual se reduce a:

ESTE ENUNCIADO ES FALSO.

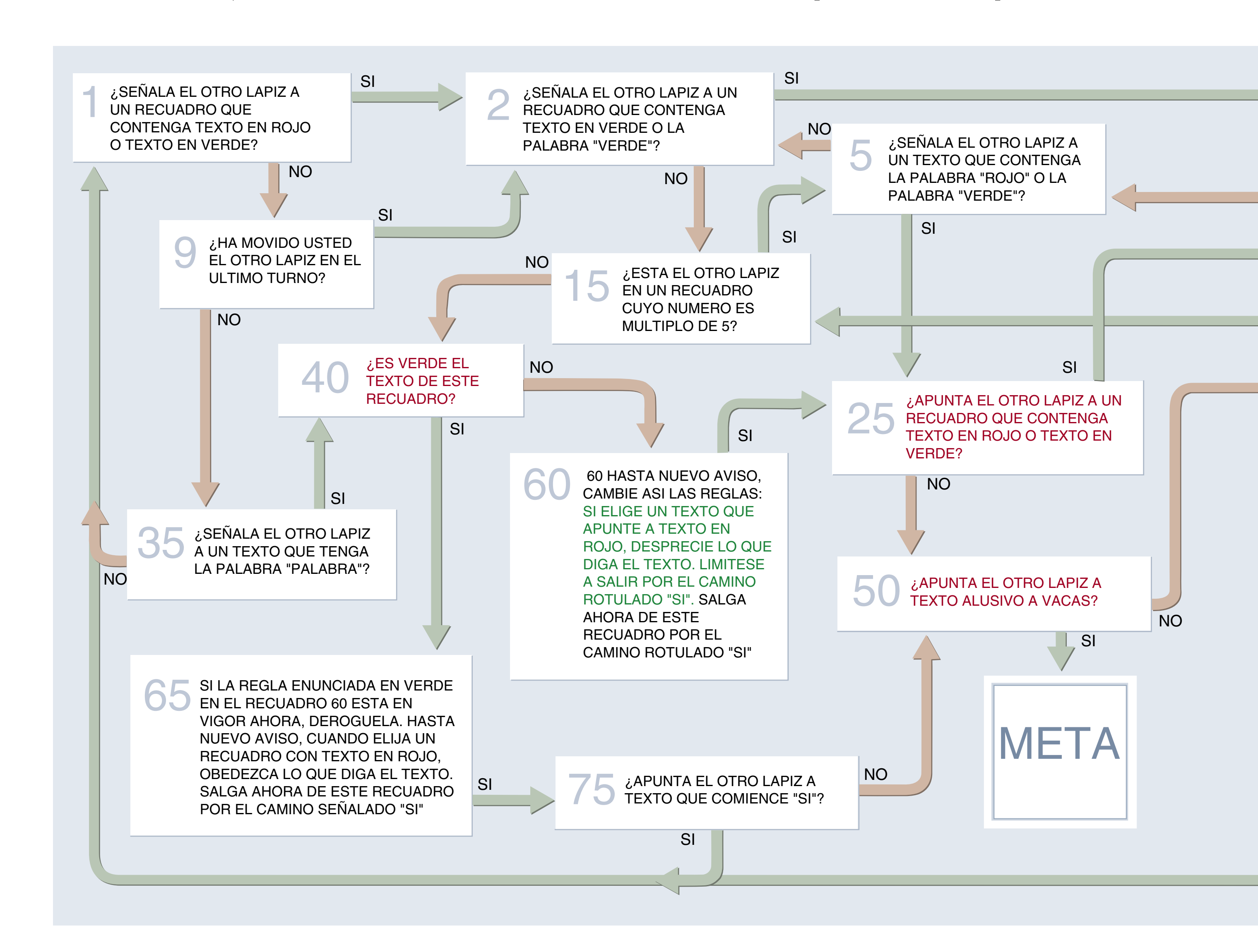
Veamos, ¿es falso o no este enunciado? En cualquier hipótesis tendremos dificultades. Y no faltan tampoco enunciados mutuamente alusivos, como

LA FRASE SIGUIENTE ES VERDADERA

LA FRASE ANTERIOR ES FALSA

Desde el punto de visto lógico, un campo de minas.

La autoalusión constituye un importante campo de estudio para los lógicos. Pero la cuestión realmente importante (desde mi punto de vista)



es ésta: ¿Puede servir la autoalusión para crear mayor confusión en los laberintos? La respuesta, me alegra decirlo, es afirmativa.

Vemos el laberinto de Abbott en la figura al pie. No sólo es autoalusivo el texto, sino que las reglas para desplazarse por el laberinto cambian dependiendo de cómo nos movamos. Para recorrer el laberinto se necesitan ambas manos y conviene sostener en cada una un lápiz o algún otro indicador que nos ayude a recordar dónde nos encontramos. Para empezar, coloque un lápiz en el recuadro 1 y otro en el recuadro 7. (La numeración de los recuadros no es estrictamente secuencial: ello es deliberado.) El objetivo consiste en efectuar una serie de movimientos de modo que al menos uno de los lápices acabe apuntando al recuadro rotulado META. Para realizar un movimiento se elige uno de los lápices y se siguen las instrucciones contenidas en el recuadro hacia el que apunta. Eso es todo. No es necesario decidir nada más, excepto al obedecer las instrucciones del recuadro 55.

Supongamos, por ejemplo, que empezamos eligiendo el lápiz que apunta hacia el recuadro 7. La respuesta a la pregunta del recuadro ("¿Se encuentra el otro lápiz en un recuadro cuyo número sea impar?") es, evidentemente, afirmativa. Tendremos, pues, que mover el lápiz del recuadro 7 a lo largo del camino rotulado "SI", que desemboca en el recuadro 26.

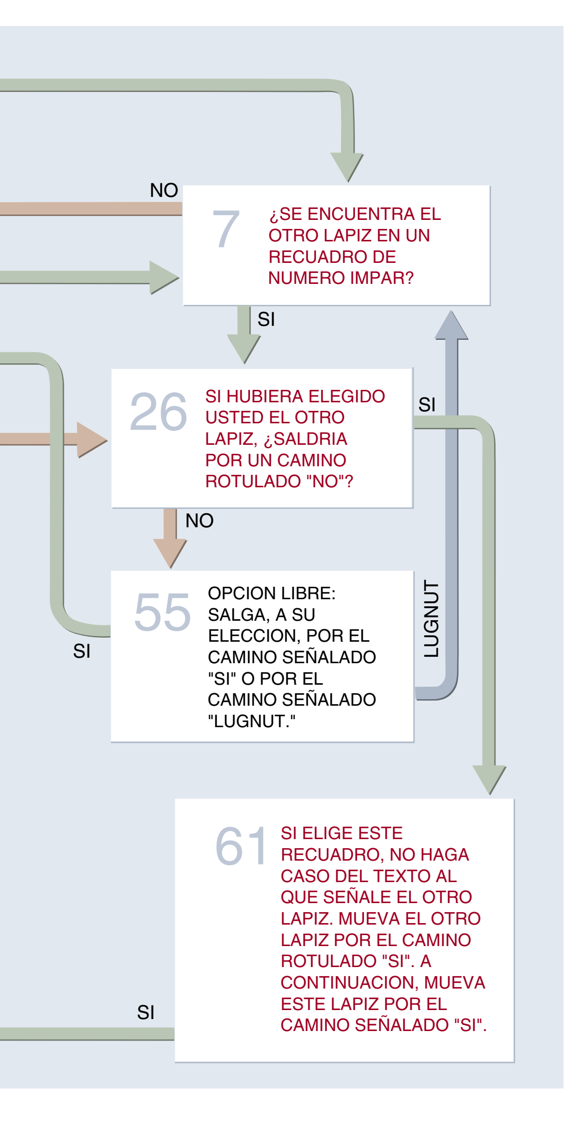
¿Le parece fácil? Espere un momento y verá. Supongamos ahora que elegimos el lápiz del recuadro 26. "Si hubiera elegido usted el otro lápiz, ¿saldría por un camino rotulado NO?" Vamos a ver... El otro lápiz se encontraba (y allí sigue estando) en el recuadro 1. Si ése hubiera sido el elegido, la pregunta habría sido: "¿Apunta el otro lápiz hacia un recuadro que tiene texto rojo o texto verde?" El recuadro número 7 contiene, en efecto, texto rojo, y tal pregunta del recuadro 1 tiene respuesta afirmativa. Por tanto, el lápiz hubiera salido por el camino SI. Todo lo cual entraña que la respuesta de la pregunta del recuadro 26 es "no". En consecuencia, el lápiz del recuadro 26 se desplaza ahora a lo largo del camino NO y acaba en el recuadro 55.

¡Uf!

La mayoría de los recuadros plantean preguntas. La salida que tomemos dependerá de la respuesta. Algunos, sin embargo, funcionan de distinto modo. El recuadro 61 nos ordena desplazar ambos lápices, y el movimiento no está terminado hasta que lo hagamos. El recuadro 55 tiene una salida rotulada LUGNUT en lugar de la salida NO habitual. Tal hecho crea realmente una diferencia, por ejemplo, si el otro lápiz apunta al recuadro 26.

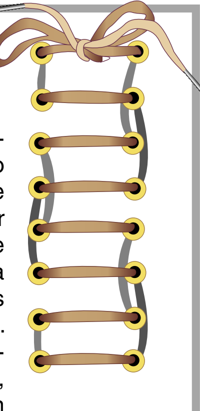
Los recuadros de efectos drásticos son el 60 y el 65. El recuadro 60 cambia la regla para salir de un recuadro con texto rojo, sustituyéndola por la orden "Salga, sin más, por el camino marcado SI", a la cual denominaré "norma 60". El recuadro 65 deroga la norma 60. Es posible tener un lápiz apuntando al recuadro 60 y otro al 65. Cada recuadro nos dice, efectivamente, que hagamos caso omiso del otro. Empero, ello no provoca problemas de autoalusión, porque hemos de elegir a cuál de ellos obedecer;

¿Dónde están las vacas? es un laberinto autoalusivo (que nada tiene que ver con vaca alguna)





Acuse de recibo



Varios lectores pusieron en entredicho la conclusión del artículo de septiembre, que afirmaba que el método americano de pasar los cordones de los zapatos estriba en emplear menor longitud de cordón. En mi análisis se suponía tácitamente que el cordón pasa alternativamente por los ojetes de los lados derecho e izquierdo del zapato. Eliminando esta condición resultan posibles enlazados más cortos (si bien, por razones prácticas, los cordones han de ser más resistentes). Frank C. Edwards III, de Dallas, descubrió dos métodos más cortos (*que podemos ver a uno y otro lado de este recuadro*) en el caso de que n sea par, ambos de longitud $(n-1)(g+2d)$. En el caso de $n=8$, $g=2$ y $d=1$, la longitud es 28, frente a los 33,3 del enlazado americano.

El enlazado dibujado a la derecha fue también enviado por Michael Melliar-Smith, de Santa Barbara, por Stephen Wallet, de San Diego, y por varios otros lectores. Neil Isenor, de Waterloo, recordaba que un compañero de habitación, cadete de academia militar, se lo había enseñado allá por los años cincuenta. William R. Read, de Vancouver, refiere que "siendo soldado de infantería en la segunda guerra mundial, se me exigió que pasara los cordones de las botas" de esa misma manera, añadiendo que el sistema era conocido por "enlazado canadiense".

Maurice A. Rhodes, de Nelson, remontó el método hasta los escoceses, preguntando si había olvidado mi ascendencia. (A pesar de mis apellidos, el último ascendiente escocés que he podido localizar es mi tata-tata-tara-abuelo, un capitán de la marina mercante llamado Purves, que está enterrado en la catedral de Canterbury.) Rhodes explicaba que el mismo método les era enseñado a los cadetes de la fuerzas aéreas en las Reales Academias Militares de Canadá a finales de los años cuarenta. Y Donald M. Graham, de Vancouver, me informó de que su hija, que tiene 10 años, inventó el método por sí misma la primera vez que tuvo que poner cordones nuevos en sus zapatillas de baloncesto.

INDICACIONES

He aquí algunas sugerencias, por si después de probar todo lo anterior sigue atascado:

- Para alcanzar la META, es preciso llegar a la posición (50,50), en la cual ambos lápices apuntan al recuadro 50 y la regla 60 no está en vigor. La verdad es que las otras dos estrategias para terminar no pueden en realidad llevarse a la práctica.
- Para alcanzar (50,50) es preciso llegar antes a (35,35). Nos encontraremos entonces a 18 pasos de la META.
- Para llegar a (35,35) es preciso arribar a (61,75) y mover el lápiz al recuadro 61. Ambos lápices pueden moverse entonces al recuadro 1. Desde aquí resulta fácil alcanzar (35,35).
- Hay muchas formas de llegar desde la salida (1,7) hasta (61,75). Todas ellas requieren activar el recuadro 60 y cancelarlo después en el recuadro 65.

SOLUCION

En cada uno de los pares siguientes, el número rojo designa el lápiz que se debe elegir mover. Un asterisco indica que la regla 60 está en vigor.

(1,7), (1,26), (2,26), (15,26), (26,40), (26,60), (55,60), (25,55)*, (7,55)*, (26,55)*, (55,61)*, (15,61)*, (40,61)*, (61,65)*, (61,75), (1,1), (1,9), (1,35), (9,35), (35,35), (35,40), (35,60), (25,35)*, (7,35)*, (26,35)*, (35,61)*, (1,35)*, (9,35)*, (2,35)*, (15,35)*, (5,35)*, (5,40)*, (25,40)*, (25,65)*, (25,75), (50,75), (50,50), META.

no hemos de secundarlos ambos al mismo tiempo.

Algunas de las instrucciones pueden parecer ambiguas. Por ejemplo, el recuadro 5 pregunta si el otro lápiz apunta hacia un texto que contenga la palabra "rojo" o la palabra "verde". Si el otro lápiz apunta hacia el recuadro 1, la respuesta es claramente afirmativa. Pero, ¿qué sucede si también apunta hacia el recuadro 5, que tiene comillas en torno a las palabras "rojo" y "verde"? La interpretación de Abbott es que las comillas son irrelevantes, y que, por tanto, la respuesta es afirmativa. Asimismo, el recuadro 50 pregunta si el otro lápiz está apuntando a texto relativo a vacas; la palabra "vacas", sin embargo, no aparece en ningún otro recuadro. Por supuesto, puede que ambos lápices estén señalando hacia el 50, en cuyo caso podemos salir a META, a menos que se aduzca que el recuadro 50 no alude a vacas como tales. No se debe caer en sutilezas filosóficas de este jaez, pues corremos el riesgo de no resolver jamás el laberinto.

Puede que a estas alturas haya llegado a la conclusión de que la única forma de alcanzar la META es tener ambos lápices en el recuadro 50. Así sería en ausencia del recuadro 60: si logramos llevar un lápiz al recuadro 50 estando vigente la regla 60, entonces, con independencia de dónde se encuentre el otro, hemos terminado. De hecho, cabe concebir todavía otra forma de llegar a la META. ¿Podrá averiguarla?

La situación más extravagante que podría ocurrir se daría cuando ambos lápices apuntasen al recuadro 26. No hay una forma clara de responder a la pregunta. ¿Qué ocurre en tal caso? Con gran astucia, Abbott ha construido su laberinto de forma que solamente podrán apuntar ambos lápices al recuadro 26 cuando esté en vigor la norma 60, ¡caso en el cual se desprecia el texto del recuadro 26! Otro tanto vale si ambos lápices están apuntando al recuadro 61.

Lo que debería hacerse ahora es probar mano, sin mayores ayudas. Si no queremos recurrir al tanteo puro y duro, podemos optar entre varias estrategias. Una posible consistiría en buscar los elementos clave del laberinto. Por ejemplo, para poder alcanzar la META es preciso tener un lápiz en el recuadro 50 y estar en una situación en la que la salida correcta sea SÍ. Otro recurso consiste en trabajar retrógradamente a partir de una posición deseada.

¡Que se divierta!

Shawn Carlson

Atrape un cometa por la cola

Apenas comience el día nueve de marzo, exactamente a los 41 minutos UT (tiempo universal), un grupo de espíritus firmes y dispuestos a desafiar el invierno siberiano presenciará un eclipse total de Sol. Conforme la sombra de la Luna se aproxime al norte atravesando el gélido paisaje, nuestros intrépidos observadores verán, además de la habitual corona lunar, espectacular, un haz luminoso dibujado sobre la negrura del firmamento. El cometa Hale-Bopp (C/1995 O1 para los astrónomos), el más brillante de los últimos veinte años, así se prevé, se encontrará exactamente a 22 días de su perihelio y sólo a 13 días de su máximo acercamiento a la Tierra. Sus colas, luminosas y brillantes, producirán un espectáculo deslumbrante.

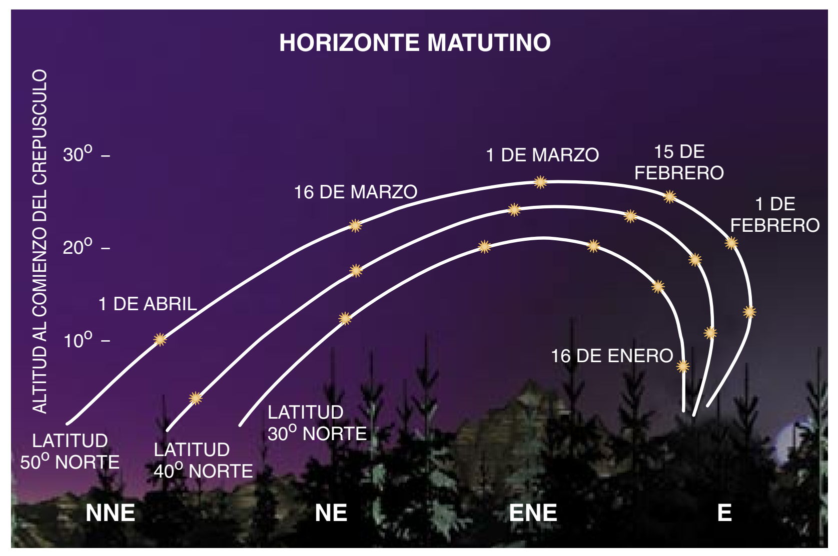
Pero si no entra en sus planes una expedición a la Siberia subártica, no se apure. Hale-Bopp promete unas observaciones sensacionales desde cualquier punto de nuestro planeta. Y ofrece a los aficionados una buena ocasión para contribuir a las investigaciones cometarias: el Centro Harvard-Smithson de Astrofísica, con sede en Cambridge (Massachusetts), está coordinando una red mundial de observadores, abierta a la participación de todos.

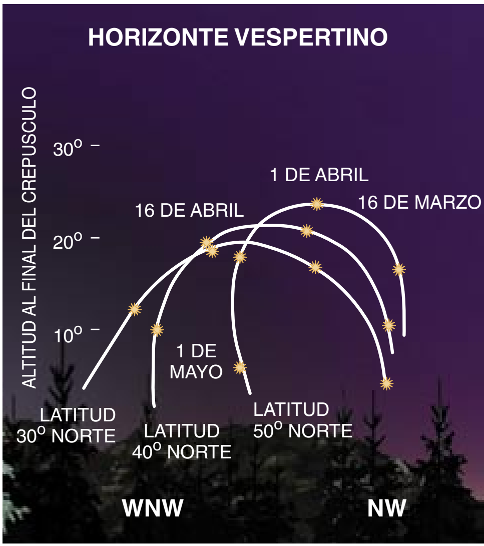
Hale-Bopp intriga mucho a los astrónomos a causa de su núcleo, especialmente activo. El núcleo de un cometa es una bola mullida de hielo y roca cuya superficie se evapora conforme ese cuerpo errante se acerca al Sol. Los consiguientes chorros de polvo y de gas componen las colas del cometa. (El polvo incandescente describe una trayectoria curva; el gas ionizado se aleja del Sol en línea recta.) El núcleo de Hale-Bopp empezó lanzando chorros visibles de residuos al pasar por la órbita de Júpiter, aproximadamente a siete unidades astronómicas del Sol (1 UA es la distancia media del Sol a la Tierra, unos 150 millones de kilómetros). Observadores experimentados han venido siguiendo a nuestro cometa desde mayo de 1996 (la mayoría de los cometas no pueden percibirse sin la ayuda del telescopio hasta pocos meses antes del perihelio), y el resto deberíamos verlo ya.

Las colas de un cometa (una de polvo, la otra de gas) nos revelan íntimos secretos sobre su composición y estructura. Brindan, además, a los observadores terrícolas un excelente laboratorio móvil para trazar una carta del viento solar. A veces, las colas se presentan adornadas de rasgos plumosos que fluyen hacia afuera bajo la influencia del viento solar. En 1974 el cometa Kohoutek deleitó a los astrónomos con al menos dos notables ejemplos de afaldonamientos de ese tipo.

Cualquier aficionado puede registrar estas y otras características de las colas de los cometas. Primero, necesitará un buen atlas estelar que represente las estrellas en función de la ascensión recta y la declinación. (Puede que el mejor y más popular sea el *Norton's 2000:0 Star Atlas and Reference Handbook*, 18.ª edición, de Ian Ridpath.) Necesitará también un compás de dibujo y una escala graduada angular en forma de ballesta. La ballesta, que haremos con una regla flexible, graduada en centímetros, y un trozo de tabla de madera permitirá ubicar los rasgos de las colas con una aproximación de 0,1 grados de arco.

Las colas pueden dibujarse directamente en la página apropiada del atlas estelar (o en una buena fo-

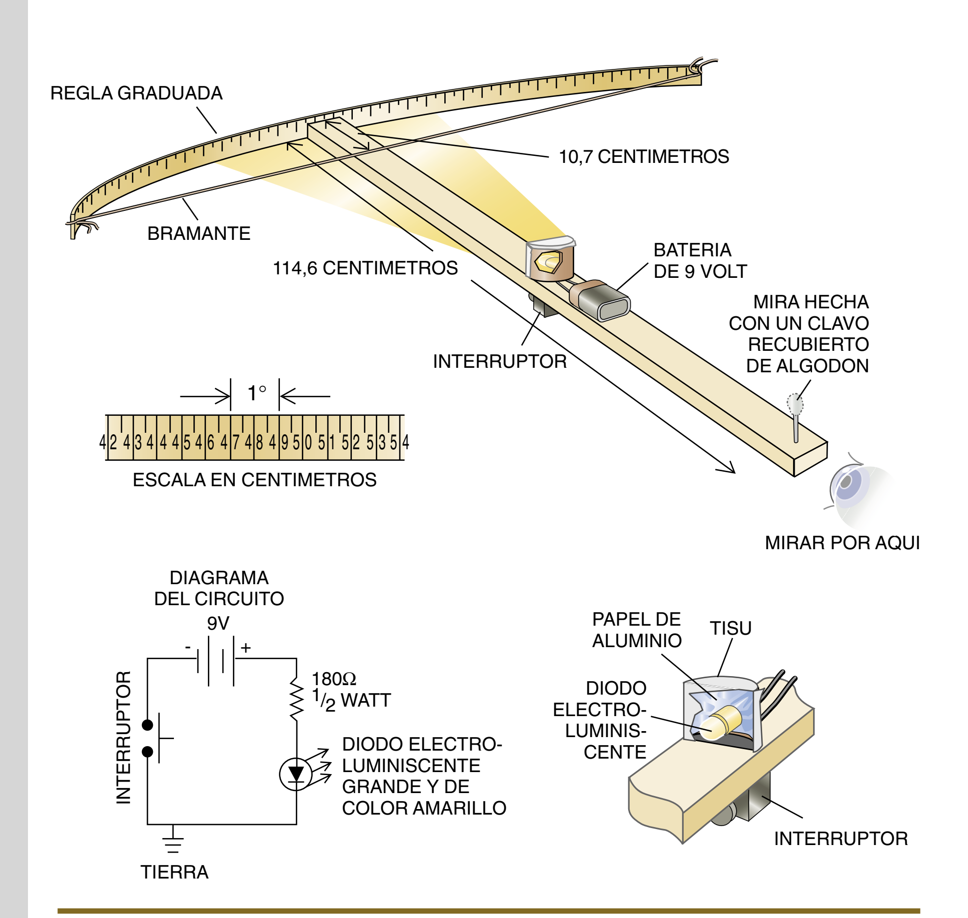




El cometa Hale-Bopp se dejará ver durante más de cuatro meses al amanecer (antes del perihelio) y al atardecer (después del perihelio). Cuanto más al norte del ecuador se encuentre uno, tanto más visible será el cometa.

Construcción de la ballesta

Para una regla graduada en centímetros, la mira se coloca a 114,6 cm de distancia. Vistos desde el clavo, cada dos centímetros abarcarán exactamente un grado. Para marcar grados y semigrados se pintan rayas blancas finas, utilizando como plantilla una ranura hecha en una carta de baraja. Un diodo electroluminiscente (LED) permite iluminar la escala para facilitar la lectura nocturna.



tocopia). La posición de la cabeza del cometa se determina midiendo la separación angular a que se encuentre respecto de tres estrellas vecinas, las más próximas, del atlas. Los mapas celestes marcan las posiciones de las estrellas en función de la declinación y de la ascensión recta; para convertir ángulos en distancias sobre la página, téngase en cuenta que una hora de ascensión recta equivale a 12 grados en el ecuador celeste. En los demás puntos del firmamento, se divide la distancia en el ecuador por el coseno de la declinación.

Para cada medición, se ajusta convenientemente la apertura del compás y se traza un pequeño arco que pase por donde se espera que se encuentre la cabeza. La posición exacta de ésta es el punto de intersección de los arcos. Se sigue el mismo procedimiento para marcar las demás características principales de las colas y luego se completa la labor con detalles más finos empleando un telescopio o unos binoculares. Si se realizan estas operaciones todas las noches despejadas, se podrá registrar la evolución de las colas.

El tamaño, el brillo y el grado de condensación de la cabellera del cometa, su coma, van cambiando con el tiempo. El mejor modo de medir el tamaño es emplear un ocular con escala calibrada. Son algo caros, pero nada los supera en precisión. Puede probarse el ocular “microguide” de Celestron, que vale unas 25.000 pesetas.

Si el bolsillo no le alcanza, puede recurrir a un procedimiento menos directo para medir el tamaño angular. Se centra un buscador telescópico sobre la cabellera y se deja que la rotación

terrestre lleve al cometa de un lado a otro del campo de visión. Se rota el retículo del aparato de modo que el cometa se desplace a lo largo de la línea horizontal; luego se cuentan los segundos que tarda la cabellera en cruzar por completo el trazo vertical del retículo. Si se conoce la declinación del cometa (por mediciones de posición sobre el atlas estelar), la anchura de la cabellera en minutos de arco no es sino un cuarto del producto del coseno de la declinación por el número de segundos. Se repite la medición tres veces al menos y se saca la media de los resultados obtenidos.

Si se dispone de un telescopio pequeño y de algo de práctica, también se puede calcular el brillo del cometa, o magnitud visible, comparándolo con estrellas de magnitud conocida. Se enfoca nítidamente el cometa con un ocular de poca ampliación (no más de 2X por centímetro de apertura del telescopio) y se trata de recordar su imagen. Luego se apunta el telescopio a una estrella cercana de magnitud conocida y se desenfoca la imagen hasta que la estrella aparezca con el tamaño del cometa. Se comparan entonces mentalmente el brillo de la estrella desenfocada y la luminosidad del cometa. Hay que buscar estrellas de brillo muy parecido al del cometa, pero una ligeramente más tenue y otra algo más brillante (recordando que a menor magnitud corresponde mayor brillo). Así podrá estimarse en qué punto del intervalo entre ambas luminosidades cae el brillo del cometa. Para más información sobre la escala de magnitudes, consúltese cualquier texto elemental de astronomía.

Al estimar magnitudes hay que tener en cuenta algunas cosas. La atmósfera absorbe mucha más luz cuando los cuerpos celestes están próximos al horizonte; por tanto, si la elevación del cometa fuese inferior a 30 grados, únicamente se le debe comparar con estrellas que estén más o menos a la misma altura. No conviene emplear estrellas rojas para las comparaciones, pues el ojo humano es menos sensible al rojo. Si en el catálogo de que se disponga la estrella figurase como de tipo K, M, R o N, o si la magnitud V–B (visible-menos-azul) de la misma fuese mayor que 1,0, búsquese otra estrella más azul. Es probable que resulte útil practicar esta técnica estimando el brillo de otras estrellas de magnitud conocida. Los observadores avezados pueden lograr precisiones de 0,1 o 0,2 en magnitud.

Si se quiere saber más acerca de la observación de cometas o informarse de cómo colaborar, hay que ponerse en contacto con el Centro Harvard-Smithsonian de Astrofísica en icq@cfa.harvard.edu, visitar su página World Wide Web en http://cfa-www.harvard.edu/cfa/ps/icq.html, o bien escribir a Daniel W. E. Green, Smithsonian Astrophysical Observatory, 60 Garden St., Cambridge, MA 02138. Expreso aquí mi agradecimiento por las informaciones verbales de Dan Green. Les sugiero adquirir la reciente publicación del centro *Guide to Observing Comets*, que es la referencia definitiva sobre el tema, remitiendo quince dólares, pagables a International Comet Quarterly, a la misma dirección. Y, por favor, envíen sus colaboraciones. La información de nada sirve si no se comparte.

Para información acerca de otros proyectos para aficionados, visite la página World Wide Web de la Society for Amateur Scientists en http://www.thesphere.com/SAS/.

Barro Colorado

Cuaderno de prácticas

THE ECOLOGY OF A TROPICAL FOREST. SEASONAL RYTHMS AND LONG-TERM CHANGES. Compilado y dirigido por Egbert G. Leight, Jr., A. Stanley Rand y Donald M. Windsor. Smithsonian Institution; Washington, 1996.

Al construirse el Canal de Panamá, en 1914, se formó una isla de unos 15 km^2 de extensión como resultado de embalsar el río Chagres, protegida por el mismo lago Gatun y a una distancia razonable de la ciudad de Panamá. En esta isla se instaló en 1916 una pequeña estación biológica sostenida por naturalistas entusiastas; declarada reserva en 1923, quedó bajo la jurisdicción de la Institución Smithsonian en 1946, convirtiéndose a partir de l966 en el Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales. Ha sido meta de un flujo ininterrumpido de visitantes, hasta el punto de que "Barro Colorado", nombre con que se conoce a la isla, ha centrado quizá la máxima densidad de estudios sobre bosques tropicales.

Es un espacio lluvioso (2500 mm anuales). Después de los primeros meses del año relativamente secos, la estación de las lluvias empieza hacia el final de abril. Las perturbaciones experimentadas por la vegetación original han sido moderadas. En una hectárea se cuentan todavía, en promedio, unas 57 especies representadas por árboles con más de 60 cm de circunferencia. La estación ha servido para iniciar en la ecología tropical a generaciones de estudiantes de muchos países.

En 1982 se publicó una primera edición de la obra que reseñamos. La presente, segunda, edición sólo difiere de aquélla por la adición de un "Epílogo" de 34 páginas, que resume el resultado de investigaciones realizadas durante el período 1980-l994. Este libro viene a ser equivalente a un cuaderno de prácticas muy útil, aunque incompleto, que puede servir de introducción general a temas de ecología tropical. La reciente disponibilidad de esta nueva edición podría ser oportuna, ante la posibilidad, anunciada en septiembre pasado, de que se cree una Estación Biológica Hispano-Panameña en la isla de Coiba, en pleno Pacífico, mucho mayor que Barro Colorado.

La obra que comentamos consta de 32 capítulos bastante heterogéneos, muchos de ellos escritos por varios autores. Quedan repartidos en 7 secciones que tratan, respectivamente, del entorno físico, el entorno biótico, ritmos estacionales de las plantas, animales frugívoros, insectos de las copas de los árboles y sus depredadores, artrópodos del mantillo y sus depredadores, y fluctuaciones de largo período. El número total de autores que han contribuido a la redacción del conjunto se acerca a 40, y destaca la intensa labor de coordinación debida a Egbert G. Leigh, Jr. No existen otras publicaciones de semejante carácter, aunque, por lo que se refiere al tema, se pueden recordar las investigaciones dirigidas por H. T. Odum en El Verde, en Puerto Rico, y trabajos recientes centrados en Costa Rica (D. Janzen y otros), más otros proyectos en marcha en diversos puntos de Perú y Amazonía.

A pesar de su carácter probablemente efímero, esta obra, construida sobre la marcha, contiene valiosos datos numéricos y proporciona información y sugerencias útiles de lo que pueden dar investigaciones más completas. Por lo menos permite darse cuenta de problemas que son particularmente importantes en la ecología de los sistemas de alta diversidad, de los que tanto se habla, más para mencionar los riesgos que los amenazan que para contribuir a su conocimiento. Destacan informaciones interesantes sobre hormigas, la sincronización en los procesos de floración, fructificación, germinación y de cómo los animales dependen de ellos, desde las propias hormigas hasta los tucanes, los grandes roedores, coatíes y monos en sus distintas especies. Leer o simplemente hojear estas páginas sugiere muchos temas de investigación y hasta cómo podrían organizarse cursos muy creativos. Falta por hacer mucho trabajo taxonómico, aunque se examinan distribuciones por tamaños que pueden servir para comentar temas de biodiversidad y, a la vez, evidencian la falta que seguimos teniendo de la tradicional taxonomía de museo.

RAMÓN MARGALEF

Astronomía

Tres momentos

ASTRONOMY. Dirigido por Michael Hoskin. Cambridge University Press; Cambridge, 1997.

NICOLAUS COPERNICUS GESAMTAUSGABE. BRIEFE. Edición preparada por Andreas Kühne con la colaboración de Friederike Boockmann y Stefan Kirschner. Akademie Verlag; Berlín, 1994. **COPERNICO E LA QUESTIONE COPERNICANA IN ITALIA DAL XVI AL XIX SECOLO.** Edición de Luigi Pepe. Florencia; Leo S. Olschki, 1996. **BETWEEN COPERNICUS AND GALILEO. CHRISTOPH CLAVIUS AND THE COLLAPSE OF PTOLEMAIC COSMOLOGY**, por James M. Lattis. The University of Chicago Press; Chicago, 1994. **THE CORRESPONDENCE OF JOHN FLAMSTEED, THE FIRST ASTRONOMER ROYAL.** Compilación y aparato crítico de Eric G. Forbes, Lesley Murdin y Frances Willmoth. Institute of Physics Publishing; Bristol, 1995.

A HISTORY OF ASTRONOMY. FROM 1890 TO THE PRESENT, por David Leverington; Springer; Heidelberg, 1996. **THE NEW ASTRONOMY**, por Nigel Henbest y Michael Marten; Cambridge University Press; Cambridge, 1996. **SUPERNOVAE AND NUCLEOSYNTHESIS**, por David Arnett. Princeton University Press; Princeton, 1996.

Sin subvertir ningún orden, ni anular ningún principio establecido, la astronomía está experimentando una revolución peculiar. Para apreciarla en su debida perspectiva, nos ayudará la lectura del manojo de libros que traemos a colación. Sirva de pórtico y marco general la obra coordinada por Michael Hoskin: *Astronomy*, aproximación didáctica y de sobresaliente valor documental, que se inscribe en la serie *The Cambridge Illustrated History of...*

Mucho antes de la invención de la escritura y de la construcción de instrumentos de observación, el cielo constituía un recurso socorrido. Los campesinos fiaban en las estrellas para determinar el momento de la

siembra. Por ellas se guiaban los navegantes polinesios y micronesios en mar abierto. Hasta el siglo XVII, la astronomía se atuvo a dos propósitos: mostrar la regularidad de los movimientos de los planetas y predecir su curso. En el primer objetivo destacaron los griegos; en el segundo, los babilonios. La tradición babilónica se fundió con la astronomía griega tras la conquista de Alejandro.

Para Aristóteles, en el centro del cosmos ordenado y racional residía la Tierra estable, rodeada por una capa de agua (los mares), ceñida a su vez por otra de aire (la atmósfera), limitante con un círculo de fuego. En el mundo sublunar, había vida y muerte, generación y corrupción. Los cuerpos celestes, por contra, expresaban la inmutabilidad de su naturaleza "etérea" por la permanencia de sus movimientos circulares. Pero los períodos ocasionales de movimiento retrógrado seguido por cinco planetas eran ejemplos arquetípicos de irregularidad. Platón había planteado la posibilidad de demostrar, no obstante, la regularidad de los movimientos planetarios.

Eudoxo de Cnido pergeñó una primera solución, en la que el planeta procedía adelante y hacia atrás trazando una figura en ocho, una hipopeda. Apolonio de Pérgamo, famoso por su dominio de la geometría de las cónicas, ideó varios modelos. En uno, el planeta daba vueltas en torno a la Tierra, pero su centro no estaba en ésta, sino que recorría *círculos excéntricos*. En otro, el planeta se movía uniformemente en un círculo pequeño, en un *epiciclo*, cuyo centro se portaba en un círculo mayor, o *deferente*, centrado en la Tierra. Si la celeridad del movimiento del planeta por el epiciclo adelantaba la del epiciclo por el deferente, se producía una retrogradación aparente.

Las observaciones que recoge el *Almagesto* de Ptolomeo se fechan entre el 127 y el 141 d. C. La obra del alejandrino se llamaba *Megale syntaxis* o *Compilación matemática*, conocida también por *Gran Compilación*, que los astrónomos árabes tradujeron en *al-majisti* ("la mayor"), latinizada por los medievales en *Almagestum*. Contenía modelos geométricos y tablas para el cálculo de los movimientos planetarios; basaba los modelos en los círculos excéntricos, los epiciclos y el ecuante. Añadía un catálogo de un millar de estrellas dispuestas en 48 constelaciones, con la longitud, latitud y brillo aparente de cada una de ellas. Más tarde, revisó las tablas y compiló el *Almagesto* en las *Hipótesis planetarias*, donde agregó la dimensión física a la modelización geométrica. El punto ecuante de Ptolomeo viola el principio de la uniformidad del movimiento circular. Supongamos que la Tierra se encuentra a determinada distancia del centro de un círculo. El ecuante viene a ser la imagen especular de la Tierra y se halla en el lado opuesto del centro y a igual distancia del mismo. Pero este artificio nunca acabó de convencer a los astrónomos posteriores.

El desarrollo de la astronomía entre los árabes tuvo que ver con tres problemas que se le planteaban en la vida diaria, y que no eran otros que el calendario lunar, el tiempo de la plegaria y la orientación arquitectónica de las mezquitas. En el calendario que habían heredado de su entorno preislámico, los doce meses lunares se habían incrementado con uno más intercalado para ajustarlo a los años solares. Cada mes comenzaba con luna nueva, entendida no en sentido astronómico (cuando el Sol, la Luna y la Tierra están en línea recta), sino en sentido práctico, cuando el creciente lunar hace su aparición en el cielo.

Siguiendo el ejemplo de al-Khwarizmi, se confeccionaron tablas para hallar la hora del día a partir de la altitud del Sol o la hora de la noche a partir de las altitudes de las estrellas brillantes. Resolver cualquiera de esos problemas exigía hallar los lados o los ángulos desconocidos de un triángulo en la esfera celeste a partir de lados y ángulos conocidos. En el siglo nono los árabes manejaban las seis funciones trigonométricas modernas. Las *Tablas Toledanas* de cómputo del tiempo, preparadas por al-Zarqali (nuestro Azarquiel), gozaron de amplísima difusión y sirvieron de modelo de las *Tablas Alfonsinas* que, desde el comienzo del siglo XIV, dominaron el cómputo hasta el Renacimiento.

La calidad de las obras traducidas al latín puso al descubierto las limitaciones de los textos al uso. El primero en llenar ese vacío fue John de Holywood ("Sacrobosco"), autor de un *Tractatus de sphaera*. Constaba éste de cuatro libros, donde exponía la esfericidad del cosmos y de la Tierra, la eclíptica, el zodiaco, orto y ocaso de los cuerpos celestes, longitud del día y la noche, los siete "climas" y movimiento planetario. La *Esfera* de Sacrobosco resultaba insuficiente. Aparecieron libros que abarcaban teoría y cálculos planetarios más avanzados, como la *Theorica*



Nicolás de Oresme en su estudio, junto a una esfera armilar



Observatorio de Madrid en 1848

planetarum, que explicaba las construcciones ptolemaicas básicas, y los *Canones* (reglas) que acompañaban las tablas alfonsinas y toledanas. *Sphaera*, *Theorica* y *Canones* formaron el núcleo de la enseñanza astronómica de la Edad Media latina. Viena, en el siglo XV, se convierte en centro reformador con Georg Peurbach y Johannes Muller de Königsberg ("Regiomontano").

En 1473 nace Nicholas Copernicus en Torun. Tras una primera instrucción filosófica y astronómica en Cracovia, marcha a Italia, para cursar derecho en Bolonia y medicina en Padua. Su teoría heliocéntrica ("in medio vero omnium residet Sol") aparece esbozada en el *Commentariolus*, escrito antes de 1514, y desarrollada plenamente en el *De revolutionibus Orbium Coelestium Libri VI* (1543). Aquél reflejaba su insatisfacción con los ecuantes e introducía el heliocentrismo en siete postulados. Con el *De revolutionbus* satisface dos propósitos complementarios. En el libro primero demostró las consecuencias de la proposición según la cual la Tierra era un planeta en órbita alrededor del Sol. Los libros restantes se proponen demostrar que podían calcularse tablas adecuadas a partir de modelos geométricos con el Sol en el centro.

A través de sus cartas (*Briefe*), que abren el volumen sexto de la serie "Documenta copernicana", conocemos la vida diaria del canónigo. En la enviada a cierto adolescente, en 1514, se lamenta de que su doctrina sobre el movimiento de la Tierra les parezca a algunos absurda e impía; él confía en que el papa Paulo III acabe con esas calumnias. (A este pontífice le dedicaría más tarde su obra capital.) Abundan las epístolas que reclaman su competencia médica. Vemos cómo se le asignan los trabajos relacionados con la economía del cabildo. Interesante, por demás, es la carta, de 1536, que le remite Nicolaus von Schönberg, legado papal. Le dice en ella el cardenal de Capua tener conocimiento, y quiere saber más, de su enseñanza de un nuevo sistema en el que la Tierra se mueve, que el Sol ocupa el centro del Universo, que el octavo cielo no está inmóvil y fijo de un modo permanente y que los planetas giran en torno al Sol. A medida que nos acercamos a la fecha de publicación del *De revolutionibus*, se advierte la inquietud de quienes pretenden limitar la doctrina copernicana a mera hipótesis. Andreas Osiander expone, en dos ocasiones, que las hipótesis no son artículos de fe, sino fundamentos del cálculo que, aunque fueran falsos, podrían representar exactamente la apariencia de los movimientos. Esa obsesión del militante luterano le llevará a anteponer, nada menos, un prólogo anónimo y engañoso a la primera impresión del de *De revolutionibus*. El lector español agradecerá la inclusión de la carta, en castellano, que Sebastian Curtz envía a Carlos V, donde nos muestra un emperador preocupado por la astronomía. Datada el 21 de marzo de 1543, le anuncia la buena nueva heliocéntrica.

De la resonancia del heliocentrismo en Italia, entonces a la cabeza de la ciencia europea, nos da buena cuenta *Copernico e la questione copernicana*..., volumen que recoge las ponencias presentadas en el congreso organizado por la Universidad de Ferrara con ocasión del 450º aniversario de la muerte de Copérnico y publicación del *De revolutionibus*. A Copérnico y a su obra están dedicados los primeros trabajos. Otras contribuciones desentrañan las vicisitudes del heliocentrismo desde la reforma gregoriana del calendario hasta finales del siglo XVIII.

Pese a las dificultades iniciales creadas por Lutero y Melanchton, que habían rechazado la hipótesis de la movilidad de la Tierra, la obra tuvo un éxito inmediato. Owen Gingerich pone en cifras el alcance de la influencia de la nueva doctrina. Ha registrado unos 260 ejemplares de la primera edición y casi 300 de la segunda (1566). Tras su examen, llega a la conclusión de que se difundió extensamente. La mayoría de los astrónomos del siglo XVI habían adquirido y anotado el *De revolutionibus*.

Pero faltaban pruebas ciertas de la movilidad de la Tierra. De ahí el escepticismo y la oposición de, entre muchos, Christophorus Clavius, estudiado por James M. Lattis en *Between Copernicus and Galileo*. Clavius nació en 1538. Diecisiete años más tarde lo recibe en la Compañía de Jesús el propio San Ignacio, quien lo envía a la Universidad de Coimbra, donde enseñan Pedro Fonseca y Pedro Perpinyá. En 1567 aparece ya como profesor de matemática del Colegio Romano. Publica en 1570 la primera edición del *In sphaeram Ioannis de Sacrobosco commentarius*. Cuatro años más tarde edita los *Elementos* de Euclides.

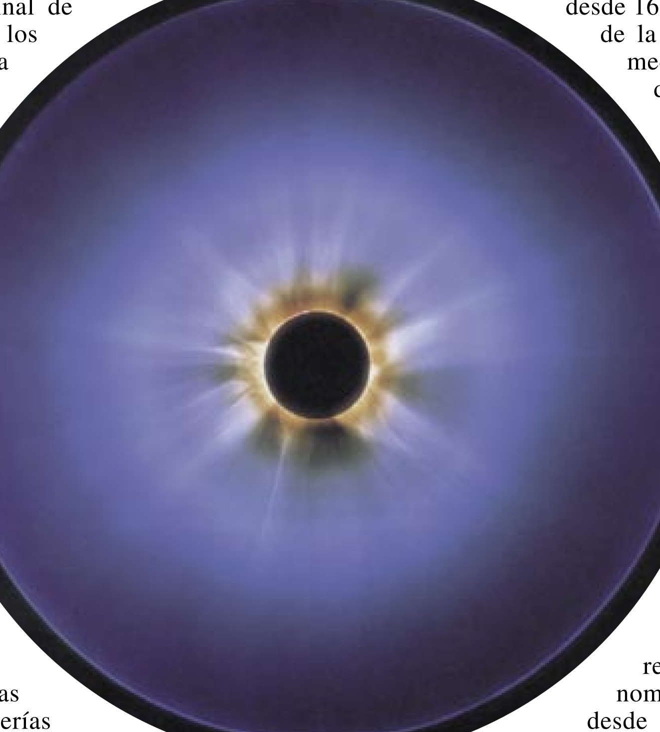
Entre la primera versión del *Comentario a la esfera* y su postrera revisión del mismo, en 1611, transcurren algunos de los acontecimientos más significativos de la revolución astronómica: la nova de 1572, el cometa de 1577, las novas de 1600 y 1604, la mejor parte de la carrera de Tycho Brahe y los primeros descubrimientos de Galileo con el telescopio. La figura de Clavius va unida al calendario de Gregorio XIII, objeto de una documentada investigación de Juan Casanovas en *Copernico e la questione copernicana*. Casanovas, aunque no niega que la obra de Copérnico se considerara en los trabajos previos a la reforma, sostiene que ésta no se apoya en el eclesiástico polaco. Para entender esa

aparente paradoja, conviene distinguir entre cosmología y astronomía. La mayoría de los expertos implicados en la reforma se adhirieron a la astronomía copernicana, a la vez que se resistían a aceptar sus hipótesis cosmológicas.

La reputación de Clavius fue un factor decisivo en el prestigio del Colegio Romano. Sus astrónomos construyeron un telescopio contemporáneamente a Galileo, lo que permitió que valorasen y respaldasen con conocimiento de causa las observaciones de éste de 1610. Por otro lado, en los textos de Clavius aprendieron matemática y astronomía René Descartes, Marin Mersenne y Pierre Gassendi. Galileo mismo se apoyó en el *Comentario a la esfera* para preparar su *Trattato della Sfera*. Al final de su vida, Clavius aconseja a los astrónomos encontrar la forma de incorporar los hallazgos de Galileo.

La alianza era imposible. No se sabe en qué momento exacto Galileo se adhirió al copernicanismo. Sus primeras declaraciones en favor del sistema copernicano no aparecieron hasta 1597, en dos cartas, una a Jacopo Mazzoni y en otra a Kepler, quien le había enviado su propio *Mysterium cosmographycum*. Galileo, consciente de la fragilidad de las argumentaciones ptolemaicas, veía también que el sistema copernicano carecía de pruebas sólidas. Pero en las postrimerías del año 1609, cuando acababa de salir de imprenta la *Astronomia nova*, con las dos primeras leyes sobre el movimiento de los planetas, se le ofrece la ocasión de demostrar la tesis copernicana. En otoño había confeccionado un telescopio más potente que todos los construidos hasta entonces. Con él logró descubrimientos decisivos el 7 de enero de 1610 y en las noches siguientes. Júpiter se acompañaba de cuatro "planetas" (satélites los llamó después Kepler) que giraban a su alrededor, como la Luna en torno a la Tierra, como los planetas en torno al Sol. He ahí, pues, la prueba buscada: había en el cielo otros centros de movimiento distintos de la Tierra. Y el mundo de Júpiter con sus cuatro satélites parecía justamente reproducir un sistema solar en miniatura. La buena nueva apareció en *Sidereus nuncius,* publicado en Venecia en marzo de 1610.

The correspondence of John Flamsteed, the first astronomer royal nos lleva a la recepción del copernicanismo en las Islas Británicas. A John Flamsteed (1646-1719) le debemos el primer catálogo general de estrellas. Carlos II le nombró astrónomo real en 1675, con el encargo de que construyera tablas lunares y estelares precisas, necesarias para que los navegantes pudieran determinar la longitud. Con ese fin se creó el Observatorio Real de Greenwich. El encontrar la longitud significaba hallar la diferencia horaria entre distintos lugares. En los años setenta muchos intentaron soluciones potenciales: Christiaan Huygens y Robert Hooke mejoraron la precisión de los relojes; Henry Bond propuso hallar la longitud a partir del comportamiento de la inclinación y variación magnética; hubo un francés que firmaba Le Sieur de St Pierre que propuso un método astronómico fundado en las posiciones de la Luna. La comisión real inglesa estableció examinar esta última propuesta.



Eclipse solar del 16 de febrero de 1980

Flamsteed serviría como director de Greenwich a cinco monarcas. Allí se llevó su pequeño cuadrante, telescopios y un ocular micrométrico que le acababa de ofrecer Jonas Moore. Más tarde incorporaría un sextante de siete pies, que sería el primer macroinstrumento de medir ángulos que podía acoplarse al telescopio, así como dos relojes de péndulo realizados por Thomas Tompion. Su resistencia a publicar nada hasta haber rematado la obra le acarreó amargos enfrentamientos con Newton.

Entre la correspondencia de Flamsteed con astrónomos del continente (Cassini, Hevelius) aparece la que mantuvo indirectamente, a través de Oldenburg, con Juan Cruzado, de Sevilla. Juan de la Cruz y Mesa era desde 1674 "piloto mayor" de la Casa de la Contratación, "arqueador y medidor de naves" y catedrático de fortificaciones y escuadrones. Se carteó con otros cosmógrafos europeos. Nos enteramos aquí de las preocupaciones del español en 1675, buen apunte para conocer las inquietudes de nuestra astronomía: posición de los meridianos, ecuación del tiempo, longitud obtenida por el método lunar, pobreza de recursos disponibles y adscripción presumible al sistema de Tycho.

Demos un salto de siglos para instalarnos en la postrera revolución, la que responde a la nueva astronomía. Sumariamente estudiada desde sus orígenes inmediatos en *A History of Astronomy. From 1890 to the Present*, podemos adentrarnos en su significado apoyados en dos libros de niveles complementarios: *New Astronomy*, una introducción de lujo, y *Supernovae and Nucleosynthesis. An Investigation of the History of Matter, from the Big Bang to the Present*, un texto de cosmología que requiere del lector cierta preparación en física nuclear y matemática.

En 1890 Thomas Edison intentó sin éxito detectar las ondas de radio procedentes del Sol y Johannes Rydberg publicó su fórmula sobre los espectros atómicos; también, salió de tiros el Catálogo Memorial Draper de espectros estelares. La astronomía había empezado a ramificarse en distintas áreas. Lejos había quedado la época en que William Herschel afirmara, por

ejemplo, que la superficie del Sol era obscura por debajo de su atmósfera brillante y podía estar habitada.

Por ceñirnos al astro, veamos la evolución en la interpretación de la temperatura. Aplicando la ley de radiación de Stefan-Boltzmann, se estimó la temperatura del Sol en unos 10.000 grados kelvin. Ocurría ello en 1890. Tres años más tarde, Wilhelm Wien demostró que la longitud de onda de la energía máxima radiada de un cuerpo negro era inversamente proporcional a la temperatura, lo que posibilitaba una estimación mucho más precisa de la temperatura solar, cifrada ahora en 6000 grados K. James Homer Lane, Arthur Rither, Robert Emden y otros habían supuesto que el calor se transportaba desde el interior hacia el exterior solar por convección. Pero en 1894 R. A. Sampson sugirió que el mecanismo primario de la atmósfera solar era la radiación, idea en la que se fundó Karl Schwatzschild para dar cuenta del obscurecimiento solar. Arthur Eddington generalizó la noción de equilibrio radiativo a la estructura interna del Sol y la estrellas, para deducir en 1926 que la temperatura del centro del Sol era nada menos que de 39 millones de grados K. Al poco, Cecilia Payne propuso que los constituyentes primarios de la atmósfera solar eran hidrógeno y helio. Henry Norris Russell admitía, en 1929, que el hidrógeno era el principal constituyente de la atmósfera solar. Eddington no tardó mucho en llegar a la conclusión de que el Sol entero se componía en buena medida de ese elemento. En justa coherencia, debía modificar su estimación de la temperatura; en 1935 la fijó en 19 millones de grados K.

En paralelo a ese progreso en astronomía solar, se van sucediendo nuevas teorías cosmológicas. Tras haber expuesto su teoría general de la relatividad, Einstein se aprestó a examinar la estructura del universo. Pero sus ecuaciones predecían que el universo estaba en expansión o en contracción. Partidario del carácter estático del universo, introdujo en sus ecuaciones un artificio corrector *ad hoc*, el término cosmológico. No pareció convencer. Willem de Sitter, fundado en las propias ecuaciones einsteinianas, articuló su hipótesis del universo en expansión. Aleksander Friedman desarrolló la teoría de Einstein sin el término cosmológico, y mostró que si la densidad media del universo era mayor que 5×10^{-30} gramos por centímetro cúbico, la gravedad forzaría el universo al colapso sobre sí mismo, pero si el universo tenía una densidad inferior, el universo se expandiría indefinidamente. Luego, Georges Lemaître vinculó la teoría de la relatividad a los corrimientos hacia el rojo de las galaxias y propuso la tesis de la gran explosión. Por fin, en 1931, Einstein abandonó su término cosmológico. En 1948 Hermann Bondi, Thomas Gold y Fred Hoyle postularon la teoría del estado estacionario del universo, según la cual los átomos de hidrógeno se crean incesantemente a una velocidad que mantiene constante la densidad del universo. En su versión modificada de los años cincuenta, lo que se crea sin cesar son los neutrones.

Todo ello es preámbulo de la nueva astronomía, que Nigel Henbest y Michael Marten nos abren en bellísimo atlas comentado. Presentan una iconografía única con imágenes obtenidas por el *Telescopio Espacial Hubble* y detectores de rayos X en órbita, así como otras procedentes de radiotelescopios y telescopios de infrarrojos. Fuente suplementaria de información son las lentes gravitorias, auténticos telescopios naturales creados por la materia obscura que rodea a otras galaxias. Sin olvidar las imágenes extraídas de la radiación de fondo del universo.

Mientras que la astronomía tradicional se ocupaba de estudiar la radiación óptica, la nueva astronomía, fenómeno del último tercio del siglo XX, abarca todas las radiaciones emitidas por los objetos celestes: rayos gamma, rayos X, ultavioleta, radiación óptica, ultravioleta y ondas de radio. A medida que los astrónomos han ido domeñando una longitud de onda, han rastreado el firmamento en busca de fuentes de esa radiación, midiendo su brillo y espectros y levantando mapas provisionales, resueltos a veces en diagramas de contorno. Más tarde, telescopios y detectores se encargarían de producir imágenes pormenorizadas de los objetos observados. Hasta los años ochenta no empezó a disponerse de imágenes a longitudes de onda distintas de la óptica, cuyo procesamiento hubiera sido poco menos que imposible sin potentes ordenadores.

A veces la imagen óptica es la que ofrece menos interés. Nubes de polvo velan por completo los lugares donde nacen las estrellas, regiones éstas cabalmente observadas gracias a la radiación ultravioleta y de radioondas. En la inmensidad del espacio, el gas resulta transparente, se escapa a la visión de los telescopios ópticos, pero emite radioondas y rayos gamma que lo hacen brillante a esas longitudes de onda. Los remotos cúmulos galácticos atrapan tanques de gas muy caliente, a una temperatura de millones de grados, que sólo pueden detectarse por los rayos X que emiten. Las explosiones de los centros de galaxias arrojan chorros de electrones que engendran inmensas bolsas de campo magnético, que, pese a ser la macroestructuras sin parangón del universo, resultarían invisibles a los astrónomos si no contaran éstos con radiotelescopios.

Nuestro Sol es una estrella típica —de peso medio, de edad media— que nació hace unos 4600 millones de años. Su cercanía a nosotros explica que la veamos tan luminosa. Gracias también a su proximidad podemos estudiar una estrella de tipo medio con bastante detalle. La historia del nacimiento, vida y muerte de las estrellas (termorreactores nucleares confinados en sus límites por la gravedad), las galaxias y el universo entero sólo ha empezado a entenderse en los últimos años. Es la historia que cuenta Arnett en su estudio de la evolución de la materia desde la explosión originaria hasta la generación de los núcleos, pasando por la síntesis cosmológica de hidrógeno y helio.

La materia que, mirando al firmamento, vemos lucir contiene más energía en su masa en reposo que toda la energía de la radiación de microondas liberada desde la gran explosión. Esa materia se compone de electrones, protones y neutrones, con sus formas combinadas de núcleos, átomos y moléculas. El examen de la dinámica de las galaxias revela la existencia de fuerzas de gravitación, lo que implica que hay bastante materia más, que no hemos podido detectar. Esa materia obscura y su naturaleza constituyen un auténtico rompecabezas.

En los primeros instantes tras la gran explosión se produjo una extensa aniquilación de materia y antimateria conforme el universo se iba enfriando, convirtiéndose casi toda la antimateria —lo mismo que casi toda la materia— en energía. Esto dio origen a un universo de elevada entropía, tesis que recibió su espaldarazo experimental en la observación de la radiación de fondo de microondas a 2,7 grados kelvin. En este contexto, la alta entropía significa muchos fotones (partículas de luz) por partícula de materia (electrones, protones y neutrones), o, por usar parámetros terrestres y estelares, una bajísima densidad para cualquier temperatura. En virtud de esa alta entropía, los productos principales de la nucleosíntesis cosmológica fueron hidrógeno y

helio, combustibles de las estrellas, no sus cenizas. Esta es la materia primordial.

Con el término nucleosíntesis se designan los procesos a través de los cuales los núcleos atómicos se transforman a escala cósmica. Implica el estudio los procesos acometidos por la materia primordial en las concentraciones observados en los objetos celestes (sistema solar, estrellas, gas interestelar, rayos cósmicos). Las abundancias de núcleos observadas representan las cenizas de estadios anteriores de combustión nuclear. La nucleosíntesis cosmológica es de un éxito notabilísimo. Explica las concentraciones del 98 por ciento de la materia observada del universo. Pero sólo desentraña la producción de cinco núcleos: hidrógeno, deuterio, helio-3, helio-4 y litio.

Se cree que las condiciones iniciales de la nucleosíntesis estelar son resultado de la nucleosíntesis cosmológica. En las estrellas encontramos las condiciones capaces de suministrar las abundancias de casi todos los núcleos. La evolución de las estrellas es la historia de sus transmutaciones nucleares y los efectos consecuentes en la estructura estelar.

LUIS ALONSO

Fractales

En biomedicina

FRACTALS IN BIOLOGY AND MEDICINE. Dirigido por T. F. Nonnenmacher, G. A. Losa y E. R. Weibel. Birkhäuser, Basilea, 1994.

El uso de la dimensión fractal abre nuevos campos y sugiere nuevas observaciones, pero plantea también nuevos interrogantes. ¿Se trata de algo más que un simple método de clasificación de curvas o superficies complicadas de tipo sibisemejante?¿Qué predicciones físicas pueden realizarse sobre la dimensión fractal de los diversos entes naturales? ¿Qué predicciones pueden llevarse a cabo a partir del conocimiento de dicha dimensión fractal? ¿Corresponde el empleo generalizado de fractales a una presencia real de éstos en la naturaleza, o es un artilugio de moda que permite publicar con facilidad artículos científicos? Si los fractales se hallan en la naturaleza, ¿qué tipo de procesos conducen a su construcción?

La verdad es que la introducción del concepto de objeto fractal resultó útil para zanjar diversas polémicas abiertas en biología. Así, diversas escuelas discutían, por ejemplo, acerca del área total de la superficie de intercambio gaseoso de los alveolos pulmonares o sobre el área total del retículo endoplasmático por unidad de volumen del hígado. La publicación de los primeros artículos sobre objetos fractales permitió advertir que las grandes discrepancias en estos valores obtenidos por los diversos grupos recibían una interpretación fácil, coherente y satisfactoria si se consideraba que estos elementos biológicos tienen carácter fractal. Otra de las situaciones fractales bien conocidas en biología se refiere a la estructura del árbol bronquial en los pulmones y la de los árboles vasculares capilares, que manifiestan también, en un cierto intervalo de escalas, estructura fractal. Finalmente, el estudio de la complejidad dinámica de tipo caótico determinista, que conduce a atractores extraños caracterizados por su dimensión fractal, la introducción del uso de fractales en el estudio de dinámica de poblaciones o en el análisis de series temporales complicadas como las de encefalogramas y electrocardiogramas, son otros campos en los que el uso de conceptos fractales ha sido fructífero para la biología.

El libro que comentamos recoge las 32 contribuciones a un coloquio sobre el uso de fractales en biología y medicina. Las ponencias se agrupan en tres áreas principales: morfogénesis, correlación estructura-función, y estudio de analizadores de complejidad para detectar síntomas de enfermedad con la mayor antelación posible. En todas estas áreas, las ponencias aportan avances de interés.

Destaca, en primer lugar, que los objetos fractales son ubicuos en biología, siempre y cuando se haga la precisión de que la sibisemejanza, es decir, la invariancia de los principales detalles con la escala, no se presenta en rigor en todas las escalas, como ocurre en los objetos fractales puramente matemáticos, sino que se presenta tan sólo en diversos intervalos de escala. En ocasiones, puede darse una cierta estructura sibisemejante en ciertas escalas y otro tipo de estructura sibisemejante (con una dimensión fractal diferente) en otro intervalo de escalas. Se tiene, así, el concepto de objeto multifractal.

Por otro lado, se resalta la clara insuficiencia de la dimensión fractal como clasificación eficaz de los objetos fractales. En efecto, objetos con la misma dimensión fractal pueden tener estructuras y aspectos diferentes. Para aliviar esta pérdida de información, Mandelbrot propone utilizar cierto índice de lagunaridad (que daría cuenta de la tendencia de las estructuras fractales a presentar zonas vacías), aunque resulta difícil de definir mediante un solo algoritmo simple. B. J. West *et alii* ponen de manifiesto cómo, en ciertas ocasiones, la dimensión fractal finita no puede distinguir entre ruido aleatorio de color y señal caótica, ya que procesos aleatorios gaussianos con espectro $1/f^a$, con a un exponente y f la frecuencia, tienen dimensión fractal finita pese a ser aleatorios. Por ello, West explora en los métodos basados en predicción y comparación.

DAVID JOU



Piña, un ejemplo escondido de sibisemejanza

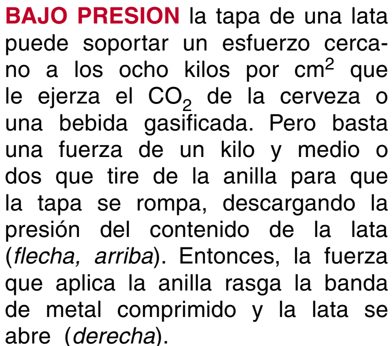
IDEAS APLICADAS

Wesley G. Rogers



“Abrefácil”

ERMAL C. FRAZE patentó la idea de un tirador de anilla que pudiera sujetarse directamente a la tapa de una lata.



BAJO PRESION la tapa de una lata puede soportar un esfuerzo cercano a los ocho kilos por cm^2 que le ejerza el CO_2 de la cerveza o una bebida gasificada. Pero basta una fuerza de un kilo y medio o dos que tire de la anilla para que la tapa se rompa, descargando la presión del contenido de la lata (*flecha, arriba*). Entonces, la fuerza que aplica la anilla rasga la banda de metal comprimido y la lata se abre (*derecha*).

Los ingenieros a quienes interese la estética de su profesión podrían fijarse en la tapa “abrefácil” que adorna tantos productos enlatados. Es ésta una invención que, bajo diferentes nombres (“abrefácil”, “tirador”, etcétera), ya ha recorrido 35 años de historia.

En la mejor tradición ingenieril, Ermal C. Fraze, fundador de la empresa Dayton Reliable Tool & Manufacturing Company, fue quien sugirió una idea práctica para construir una tapa de apertura fácil tras haber intentado con escaso éxito abrir una lata de cerveza con el parachoques de su automóvil. Durante décadas, los inventores habían tratado de idear una lata provista de abridor autónomo. Sus rebuscados proyectos habían demostrado su poca viabilidad a la vista de las complejas fases de manufactura que requería la fijación del tirador, o elemento que ejerce la fuerza para abrir la tapa de la lata. El éxito de Fraze estriba en que concibió una especie de remache, sencillo y económico, capaz de sujetar el tirador en su sitio. Este remache, a diferencia de los concebidos anteriormente, se formaba con el mismo material de la propia tapa.

Desde mediados de los años sesenta la tapa abrefácil ha experimentado docenas de perfeccionamientos. Han desaparecido los cantos vivos que podían cortar al bebedor. El tirador permanece unido a la tapa tras abrirse ésta y los encargados de la limpieza de los parques ya no deben pasar horas recogiendo chatarra de los suelos. Pero el desarrollo de esta técnica no se ha parado. Actualmente, de un kilo de aluminio se obtienen 2200 tiradores, un aumento de cuatro veces sobre las cifras iniciales de 1965. Alcanzar la simplificación de la fabricación de estas tapas para latas constituye un reto para los ingenieros del futuro.

WESLEY G. ROGERS es vicepresidente de Dayton Reliable Tool & Manufacturing Company, de Dayton (Ohio).



LA FABRICACION de una tapa abrefácil comprende: (*a*), conformación por embutición de un remache (botón metálico en relieve); (*b*), compresión de la lata hasta la mitad de su espesor inicial de 22 centésimas de milímetro; (*c*), conformación del metal; y, finalmente, fijación del tirador de anilla a la tapa de la lata (*d*).

EN SU EVOLUCION, la tapa abrefácil ha conocido numerosas variantes a lo largo de los últimos 35 años.











Seguiremos explorando los campos del conocimiento



RAYOS COSMICOS EN LAS FRONTERAS DE LA ENERGIA, por James W. Cronin, Thomas K. Gaisser y Simon P. Wordy

Estas partículas portan más energía que cualquier otro del universo. Su origen es desconocido, pero puede estar relativamente cerca.

LA ENFERMEDAD DE PARKINSON, por Moussa B. H. Youdim y Peter Riederer

Se multiplican las pruebas de que los radicales libres, moléculas extraordinariamente reactivas, ocupan un lugar central en el desarrollo de este trastorno neurológico.

APLICACIONES BIOLOGICAS DEL MICROSCOPIO DE FUERZAS, por Carlos Bustamante y Ricardo García

Como quien se mueve a ciegas, y se sirve del tacto para reconocer las formas de los objetos, este instrumento emplea una punta afilada para sentir y revelar la morfología de moléculas biológicas en soluciones acuosas.

ASI DIBUJAN LOS CIEGOS, por John M. Kennedy

Las personas invidentes y las que ven se sirven de muchos recursos similares cuando representan en dibujos esquemáticos los objetos de su entorno, lo que parece indicar que hay estrechas conexiones entre la vista y el tacto.

LOS REFRIGERADORES DE EINSTEIN-SZILARD, por Gene Dannen

Dos físicos teóricos de enorme capacidad predictiva juntaron sus fuerzas en los años veinte para reinventar el frigorífico doméstico.

GANADO TRANSGENICO PARA PRODUCIR FARMACOS, por William H. Velander, Henryk Lubon y William N. Drohan

Los biólogos introducen genes humanos de interés en mamíferos de granja y consiguen que éstos produzcan proteínas terapéuticas en su leche.

INUNDACION EXPERIMENTAL EN EL GRAN CAÑON, por Michael P. Collier, Robert H. Webb y Edmund D. Andrews

Los científicos siguen el desarrollo de una inundación controlada, provocada en la primavera de 1966 para proteger la naturaleza del río Colorado y su entorno.

TURBULENCIA CON SUPERORDENADORES, por Parviz Moin Y John Kim

Hasta hace muy poco los ordenadores no habían adquirido potencia suficiente para aclarar ejemplos sencillos de este problema clásico. En algunos casos, permitirá que los ingenieros dominen ese fenómeno.

